

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie



**UPLATNĚNÍ LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM PRO VÝROBU
TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL**

**APPLICATION OF COMPACTED GRAPHITE IRON FOR PRODUCTION
OF AUTOMOTIVE INDUSTRY THIN-WALLED CASTINGS**

Doktorand: **Ing. Petr Kosek**
Školitel: **prof. Ing. Iva Nová, CSc.,**
Vedoucí katedry: **doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld**

Liberec, 2007

Anotace: Práce shrnuje dosavadní informace o litině s červíkovitým grafitem a poznatky získané z vlastních experimentálních taveb provedených v dílnách KSP na TU v Liberci zaměřených na zjištění optimálního množství modifikátoru na bázi kovů vzácných zemin (KVZ), vlivu tloušťky stěny odlitku, chemického složení taveniny a také průtočného množství taveniny ve formě na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl.

Klíčová slova: litina s červíkovitým grafitem, kovy vzácných zemin, ochlazovací rychlost, krystalizace, mikrostruktura, mechanické vlastnosti

Annotation: Thesis summarizes existing information about compacted graphite iron and findings from author's own experimental melts conducted in workshop of KSP at TU of Liberec. Goals of experiments were determination of optimal rare earth elements amount for treatment, influence of casting wall thickness, chemical composition and flow volume of melt in foundry mould on microstructure and mechanical properties of thin-walled castings for automotive industry.

Key words: compacted graphite iron, rare earth elements, cooling rate, crystallisation, microstructure, mechanical properties

OBSAH:

1.	ÚVOD	1
	<u>Historie Litiny s červíkovitým grafitem</u>	2
	<u>Současná situace v produkci odlitků z LČG pro automobilový průmysl</u>	3
	<u>Cíle disertační práce</u>	4
	<u>Publikace vztahující se k řešení doktorské práce</u>	5
2.	CHARAKTERISTIKA LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM (LČG)	6
2.1.	POPIS STRUKTURY	6
2.1.1.	Grafit	7
2.1.2.	Základní kovová hmota	8
2.2.	MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	9
2.2.1.	Únavové vlastnosti	11
2.2.2.	Tepelná vodivost	12
2.2.3.	Tlumící schopnosti	13
2.3.	OBROBITELNOST	14
2.4.	SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI LČG	16
2.5.	KRYSTALIZACE LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM	17
2.5.1.	Krystalizace austenitu	17
2.5.2.	Krystalizace grafitu	17
2.5.3.	Eutektická přeměna	19
2.5.4.	Přeměny v tuhém stavu	20
2.6.	METALURGIE LČG	22
2.6.1.	Modifikace	22
2.6.1.1.	<i>Modifikace neseparovanými kovy vzácných zemin (KVZ)</i>	23
2.6.1.2.	<i>Nedokonalá modifikace Mg</i>	24
2.6.1.3.	<i>Komplexními slitinami Mg-KVZ-Ti</i>	25
2.6.1.4.	<i>Komplexními slitinami na bázi Mg-KVZ</i>	25
2.6.2.	Vliv aktivity kyslíku na průběh modifikace	25
2.6.3.	Očkování	26
2.6.4.	Vliv chemického složení	27
3.	SPECIFIKA VÝROBY TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z LČG	28
4.	SHRNUTÍ LITERÁRNÍCH POZNATKŮ A JEJICH POUŽITÍ PŘI ŘEŠENÍ EXPERIMENTŮ	29

5.	NÁVRH METODIKY PRO VÝROBU A HODNOCENÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z LČG.....	30
5.1.	TAVÍCÍ A LICÍ ZAŘÍZENÍ A METODIKA TAVEB.....	30
5.2.	POUŽITÉ SUROVINY.....	31
5.3.	ZKUŠEBNÍ ODLITKY A ZÍSKANÉ VZORKY.....	32
5.4.	ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	38
5.4.1.	Měření tvrdosti.....	38
5.4.2.	Hodnocení vlastností LČG podle tahových deformačních charakteristik.....	38
5.4.2.1.	<i>Nová metodika hodnocení tahových charakteristik.....</i>	<i>39</i>
5.4.2.2.	<i>Zařízení použitá pro měření a vyhodnocení tahových charakteristik.....</i>	<i>42</i>
5.5.	HODNOCENÍ MIKROSTRUKTURY.....	44
6.	POPIS PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ.....	44
6.1.	SÉRIE TAVEB PRO NAVRŽENÍ VHODNÉ TECHNOLOGIE A ZJIŠTĚNÍ OPTIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ MODIFIKÁTORU.....	44
6.2.	TAVBY PRO SLEDOVÁNÍ VLIVU Mn A Cu.....	47
6.3.	TAVBY MODIFIKOVANÉ KOMPLEXNÍM MODIFIKÁTOREM MG-KVZ PRO POROVNÁNÍ S ČISTÝMI KVZ.....	49
6.4.	TAVBY S DEFINOVANÝM PRŮTOČNÝM MNOŽSTVÍM.....	50
6.5.	KOMPLETNÍ HODNOCENÍ VYBRANÝCH TAVEB.....	53
6.6.	MĚŘENÍ AKTIVITY KYSLÍKU.....	69
6.7.	ZHOTOVENÍ PRAKTICKÉHO ODLITKU Z LČG.....	70
7.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	75
8.	PŘÍSPĚVEK K POPISU KRYSTALIZACE ČERVÍKOVITÉHO GRAFITU PŘI POUŽITÍ MODIFIKÁTORU NA BÁZI KVZ.....	87
9.	ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS.....	88
10.	SEZNAM LITERATURY.....	92

1. ÚVOD

Koncem 20. století bylo možné ve slévárenské oblasti pozorovat několik významných navzájem souvisejících trendů. Byl to velký vzestup produkce odlitků z hliníkových slitin, nárůst výroby litiny s kuličkovým grafitem na úkor odlitků z oceli a také vzrůstající zájem o specifické druhy litin, jako je litina s červíkovitým grafitem nebo izotermicky kalená litina s kuličkovitým grafitem (ADI).

Ačkoliv odlitky ze slitin železa nachází odbyt ve všech odvětvích průmyslu od stavebnictví přes těžké strojní zařízení až po energetiku, tak nejvíce diskutované je jejich využití v automobilovém průmyslu. Na rozdíl od ostatních odvětví zde totiž hrají mimořádnou roli nejen mechanické nebo fyzikální vlastnosti materiálu, ale také výsledná hmotnost odlitku. Navíc ve většině aplikací v automobilovém průmyslu se jedná o odlitky značně tvarově složité, s minimální tloušťkou stěn, takže velmi důležité jsou i technologické vlastnosti použitého materiálu.

V posledních letech významně vzrůstá použití slitin hliníku, a to zejména díky jejich nízké měrné hmotnosti, která přispívá ke snížení celkové hmotnosti automobilu a následně ke snížení spotřeby paliva. Málokdo si však uvědomuje, že získání hliníku ze surovin je energeticky mnohem náročnější než získání železa a stejně tak jsou u hliníku značně vyšší hodnoty měrné tepelné kapacity a latentního tepla, a to významně ovlivňuje spotřeby energií při ohřevu a tavení. Je tedy třeba zvážit, zda energie vložená do výroby lehké součásti není větší než energetická úspora vzniklá užitím této součásti.

Protože požadavky automobilového průmyslu na výkony, bezpečnost a nízkou hmotnost automobilů neustále rostou a mechanické a technologické vlastnosti tradičních materiálů jako slitin hliníku, litiny s lupínkovým grafitem (LLG) nebo litiny s kuličkovým grafitem (LKG) již těmto požadavkům u některých aplikací nevyhovují, bylo třeba hledat pro výrobu tenkostěnných a mechanicko-tepelně namáhaných odlitků nové materiály. Z tohoto hlediska se příznivě jeví litina s červíkovitým grafitem (LČG), která spojuje do značné míry slévárenské, mechanické a fyzikální vlastnosti LLG a LKG. Tím se stává velmi příhodným a nepostradatelným materiálem pro výrobu specifických odlitků automobilového průmyslu.

a) Historie litiny s červíkovitým grafitem

Litina s červíkovitým grafitem existuje v podstatě po celou dobu od objevu litiny s kuličkovým grafitem (LKG) a přihlášení patentu na její produkci v padesátých letech 20. stol. K. D. Millsem, A.P. Gagnebinem a N.B. Pillingem. V počátcích byla LČG často důsledkem neúspěšných pokusů výroby LKG, a tak materiál nepřitahoval pozornost výzkumu ani průmyslu. Tento typ litiny vznikl v případech, kdy obsah zbytkového Mg v litině byl nízký z důvodu odeznívání nebo příliš vysokého obsahu síry v základním kovu a v takovém případě nelze dosáhnout kuliček. Kvůli nižším mechanickým vlastnostem než má LKG nebyly výhody tohoto materiálu správně pochopeny a litina s červíkovitým grafitem se dlouho považovala za materiál podřadné jakosti, za nepodařenou LKG. Teprve v 70. letech 20. stol. při hledání slévárenského materiálu, který by spojoval vysokou pevnost a tažnost LKG s dobrou obrobitelností a tepelnou vodivostí litiny s lupínkovým grafitem, byla znovu „objevena“ LČG, která tuto mezeru zaplňuje. Od té doby bylo sice do sériové výroby uvedeno množství součástí z LČG, ale jednalo se především o odlitky s velmi širokým rozsahem přijatelné mikrostruktury a nebo odlitky při jejichž výrobě byl použit titan (dnes již v litinách nežádoucí).

Pro návrh vhodné technologie a průmyslovou produkci odlitků z LČG bylo třeba nejprve popsat proces krystalizace modifikovaných grafitických litin. K tomuto tématu vzniklo po roce 1980 ve světě i u nás velké množství teorií. Stále platné jsou práce ADREJEVA [25], STEFANESCU [26], LOPERA [16,27,28], ITOFUJI [29] z českých potom společné práce MASARYKA, BECHNÉHO, SKOČOVSKÉHO, STRÁNSKÉHO [5,8].

Díky svým specifickým mechanickým a fyzikálním vlastnostem přitahuje tato litina v posledních letech stále více pozornosti průmyslu a průmyslového výzkumu. V současnosti se problematice věnují a publikují především skandinávští autoři SKALAND, WESSÉN, ONSOJEN [14,18], a zástupci firmy Sintercast např. DAWSON [1,13,21]. Rozsáhlý výzkum vedou i americké automobilky ve spolupráci s místními univerzitami, ale výsledky svého výzkumu si pečlivě chrání. Dodnes tedy neexistuje žádná komerční slévárna zaměřená výhradně na výrobu odlitků z LČG. Tento fakt je způsoben technologickou náročností výroby takto specifické litiny a zejména její citlivostí na změny výrobních parametrů, kvalitu vstupních surovin, množství použitého modifikátoru nebo tloušťku stěny odlitků.

b) Současná situace v produkci odlitků z LČG pro automobilový průmysl

Přestože postupy pro výrobu této litiny jsou známy již několik desetiletí, k nárůstu produkce odlitků z LČG došlo až v posledních letech, kdy se někteří výrobci především bloků a hlav válců spalovacích motorů, brzdových komponent a výfukových potrubí rozhodli pro výrobu z LČG. Velkou hnací silou pro použití tohoto materiálu byl tlak především evropských automobilek, nejen na snížení hmotnosti bloku motoru, ale i na nárůst specifického výkonu, přepočítávaného na litr objemu.

Podle [21] v roce 1997 byl u evropských osobních automobilů s dieselovým motorem průměrný zápalný tlak 13,5 MPa a specifický výkon 40kW/l, v roce 2004 to již bylo 17 MPa a 60kW/l. Nyní představované vozy již mají zápalný tlak přes 20 MPa.

Pro představu jaké hmotnostní úspory lze dosáhnout použitím LČG na místo LLG při výrobě bloků motorů je uvedena *tab.1*. Že jde v dané oblasti o opravdu výjimečný materiál potvrzuje i rozhodnutí takových automobilek jako je Audi nebo BMW o výrobě bloků motorů pro Audi 3.3 V8 TDI a BMW 3.9 V8d z LČG.

Tab.1. Hmotnostní úspora při převedení výroby bloků motoru z LLG na LČG [21]

Objem motoru [l]	Typ motoru	Hmotnost bloku z LLG [kg]	Hmotnost bloku z LČG [kg]	Hmotnostní úspora [%]
1.6	I-4 benzín	35.4	25.0	29.4
1.8	I-4 diesel	38.0	29.5	22.4
2.0	I-4 benzín	31.8	26.6	16.4
2.5	V-6 Racing	56.5	45.0	20.4
4.6	V-8 benzín	72.7	59.6	18.0
9.2	I-6 diesel	158	140	11.4
12.0	V-6 diesel	240	215	10.4
14.6	V-10 diesel	408	352	14.2

Použití tohoto materiálu je však limitováno potřebou vytvoření a udržováním produkčních podmínek, aby byla zajištěna reprodukovatelnost výroby. Obtížnost zajištění přiměřené technologické jistoty a reprodukovatelnosti výroby LČG spočívá v tom, že pásmo výskytu přechodového tvaru grafitu, tzv. „produkční okno“ je velmi úzké. Navíc jeho šířka je funkcí celé řady faktorů, především chemického složení taveniny, druhu a množství modifikátoru a očkovačů a rychlostí ochlazování – ta je v praxi dána tloušťkou stěny odlitku a jeho průtočností.

Celková složitost problému a nedostatek literatury podnítily vznik mé disertační práce.

Cíle disertační práce

Snahou mé disertační práce je na základě shrnutí dostupných teoretických poznatků a provedení vlastních experimentů kvantifikovat vliv jednotlivých metalurgických a technologických parametrů na výslednou strukturu a vlastnosti tenkostěnných odlitků z LČG modifikované neseparovanými kovy vzácných zemin s tloušťkou stěn cca 3 až 10 mm. S vytyčením tohoto tématu bylo nutno řešit tyto dílčí úkoly:

- 1) Na základě provedené rešerše navrhnout metodiku prováděných experimentů. S ohledem na dostupné vybavení navrhnout tvar a rozměry zkušebního odlitku, zvolit typ a velikost slévárenské formy, tak aby jednoduchým způsobem postihovaly danou problematiku.
- 2) Určit pásmo optimálního působení modifikátorů (na bázi neseparovaných KVZ popř. komplexního Mg-KVZ) pro získání červíkovitého grafitu u tenkostěnných odlitků.
- 3) Popsat vliv základních legujících prvků na litinu zpracovávanou neseparovanými KVZ
- 4) Popsat vliv rychlosti ochlazování na výslednou strukturu a hodnoty mechanických vlastností tenkostěnných odlitků.
- 5) Výběr a stanovení kontrolních metod pro stanovení komplexní kvality odlitků v součinnosti se sledováním struktury a mechanických vlastností získaných odlitků.
- 6) Výběr vhodného průmyslově vyráběného odlitku, ověření metodiky výroby vypracované na zkušebních odlitcích
- 7) Zobecnění získaných poznatků pro průmyslovou produkci tenkostěnných odlitků z LČG pro automobilový průmysl.

Publikace vztahující se k řešení doktorské práce:

VRBA, M; KOSEK, P.; HAUZER, A.; DOLEŽAL, P.: Modifikace litiny Kovy vzácných zemin. In. DOKSEM 2003, Medzinárodný seminár doktorandov, Žilina 2003, ISBN 80-8070-153-9.

KOSEK, P.: Možnosti použití čistých KVZ pro výrobu tenkostěnných odlitků automobilového průmyslu z litiny s červíkovitým grafitem. In: Medzinárodná konferencie PRO-TECH-MA, Acta Mechanica Slovaca Košice, roč. 82-B/2004, s. 221 - 224. ISSN 1335-2393.

KOSEK, P.; ŠMRHA, J.; ZELINSKÝ, O.: Metallurgical Principles of Production of Thin-walled Vermicular/Compacted Graphite Iron Castings for Automotive Industry. In.: Mezinárodní kongres Euromat 2005, 5.-8.9.2005, Praha.

KOSEK, P.; ŠMRHA, J.: Vliv tloušťky stěny na strukturu a mechanické vlastnosti odlitků z litiny s červíkovitým grafitem. In. Technologia 2005, Bratislava, ISBN 80-227-2264-2.

NOVÁ, I.; KOSEK, P.; ŠMRHA, J.: Slévárenské simulační programy. In.MM Průmyslové spektrum č.11/2005, str. 80-82. ISSN 1212-2572.

NOVÁ, I.; KOSEK, P.; NOVÁKOVÁ, I.; ŠMRHA, J.: Metalurgické zásady výroby tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovým grafitem. In. Sorník z XI. Miedzinarodowa Konferencje odlewników polskich, czeskich i slowackich. WSPOLPRACA 2005, Zakopané, duben 2005, ISBN 83-919232-3-1.

KOSEK, P.; ŠMRHA, J.: Zásady výroby tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovitým grafitem modifikované kovy vzácných zemin. In: Medzinárodná konferencie PRO-TECH-MA, Acta Mechanica Slovaca Košice, roč. 2B/2006, s. 183 - 188. ISSN 1335-2393.

ŠMRHA, J.; KOSEK, P.; NOVÁ, I.: Mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem se zvýšeným obsahem Si. In: Medzinárodná konferencie PRO-TECH-MA, Acta Mechanica Slovaca Košice, roč. 2B/2006, s. 429 - 434. ISSN 1335-2393.

ŠMRHA, J.; KOSEK, P.; NOVÁ, I.: Vliv zvýšeného obsahu Si na základní kovovou hmotu litiny s kuličkovým grafitem. In: Mezinárodní konferencie "1. Zlievárenské sympózium", Žilina 2006.

KOSEK, P.; ŠMRHA, J.: Structural and Mechanical Properties Changes in Thin-walled CGI Castings as a Result of Production Parameters. In: Junior-Euromat, Lausanne (CH), 2006.

2. CHARAKTERISTIKA LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM (LČG)

2.1. POPIS STRUKTURY

LČG je grafitická litina (slitina železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími přísadovými prvky, kdy obsah C převyšuje jeho mezní rozpustnost v austenitu za eutektické teploty.), tzn. krystalizuje podle stabilního diagramu. Struktura je tvořena grafitem a základní kovovou hmotou. Grafit je ve struktuře vyloučen v podobě červíků. Podle ISO 945 by LČG měla na výbrusu obsahovat minimálně 80% grafitu v podobě červíků – typ III.

LČG díky způsobu výroby obvykle obsahuje též určité množství grafitu kuličkového. Norma ISO/DIS 16112 toleruje obsah kuličkového grafitu (grafit typu V a VI podle ISO 945) do 20%. Nikdy by však neměla obsahovat grafit lupínkový – jedinou výjimkou je tenká povrchová vrstva odlitku.

Způsob výroby ani chemické složení litiny není normalizované a záleží pouze na dohodě mezi zákazníkem a výrobcem. Norma uvádí pouze minimální hodnoty mechanických vlastností, které musí LČG splňovat.

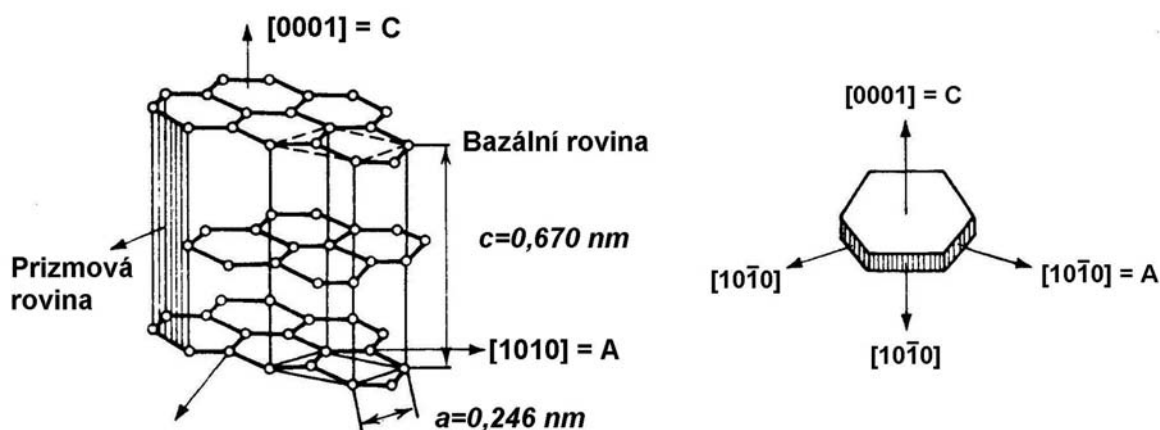
Názvosloví

Litina s červíkovitým grafitem bývá nazývána i jako litina vermikulární nebo litina s kompaktními tvary grafitu (Compacted Graphite Iron - CGI). V celém oboru panuje ohledně označování tohoto materiálu značná nejednotnost. V českých publikacích bývá nejčastěji označovaná jako LČG a grafit jako červíkovitý, německá norma materiál označuje jako GGV a grafit jako vermikulární. Literatura v angličtině materiál označuje jako Compacted Graphite Iron – CGI a tvar grafitu jako kompaktní. Norma ČSN EN ISO 945 pro hodnocení metalografické struktury označuje grafit jako červíkovitý.

Ve své práci používám pro materiál české označení LČG a tvar grafitu označuji jako červíkovitý. Do budoucna se však přikláním k používání shrnujícího výrazu litina s kompaktním grafitem, protože odlitek z tohoto materiálu nikdy neobsahuje grafit pouze v podobě červíků, ale vždy je přítomen i grafit nepravidelně a pravidelně zrnitý – vše kompaktní formy grafitu. Záleží pouze na domluvě zákazníka a slévárny, jaký typ grafitu bude v různých částech odlitku dominantní.

2.1.1. Grafit

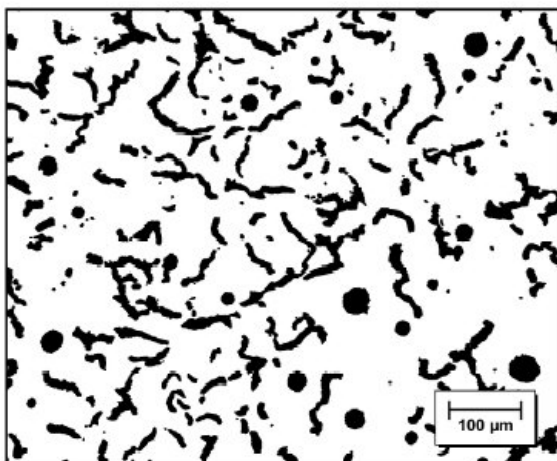
Grafit je krystalická forma uhlíku, krystalizuje v hexagonální soustavě s mřížkovými parametry 0,246 a 0,670 nm. Poloměr atomu uhlíku je 0,077 nm. Základny mřížky se nazývají bazální roviny. Směr růstu grafitu v bazálních rovinách se označuje „A“ $[1010]$. Při vytváření nových bazálních rovin se jedná o růst ve směru „C“ $[0001]$. Obvod šestihranu tvoří prismové roviny. Krystaly grafitu rostou nejnázve ve směru bazálních rovin (směr „A“), proto má grafit sklon vytvářet ploché, deskovité krystaly. Povaha vazeb uhlíku v grafitu se projevuje náznaky některých kovových vlastností, na rovinách rovnoběžných se základní má kovový lesk a svou elektrickou vodivostí se řadí mezi kovy a polovodiče. [6].



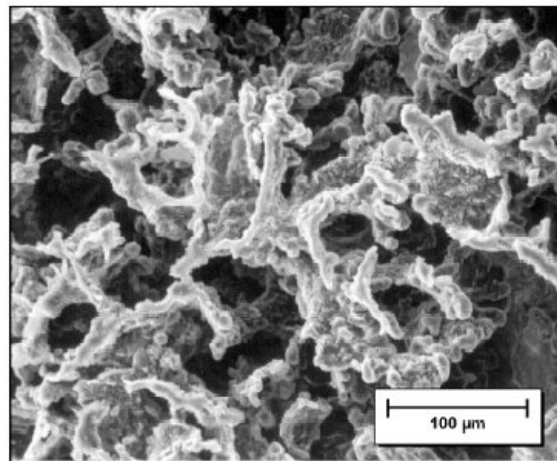
Obr.1. Krystalická stavba grafitu [15]

Hustota grafitu se udává 2220 kgm^{-3} . Teplota tání je $3700 \pm 1000^\circ\text{C}$. Grafit má velmi dobrou tepelnou vodivost, ale pevnost a tvárnost jsou nepatrné. Tvar a velikost vyloučených útvarů grafitu má tedy zásadní vliv na mechanické vlastnosti litiny.

Červíkovitý grafit má podobnou morfologii jako grafit lupínkový, ve srovnání s LLG jsou však na metalografickém výbrusu útvary grafitu kratší, tlustší a jejich konce jsou zaoblené. Při pohledu na snímky hluboko leptané LČG ze SEM elektronového mikroskopu je však patrné že tzv. červíky jsou v rámci eutektické buňky navzájem propojeny viz obr.2. Tato komplexní morfologie grafitu, zároveň se zaoblenými konci a nepravidelným povrchem vede k silné soudržnosti mezi grafitem a základní kovovou hmotou.



a)

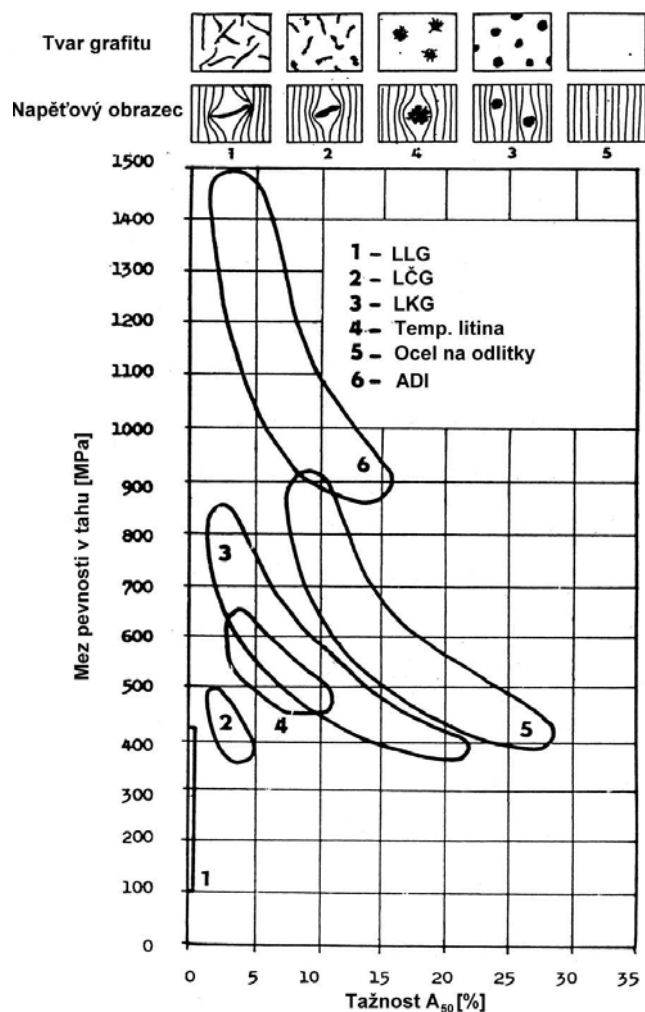


b)

*Obr. 2. Struktura červíkovitého grafitu a) na neleptaném metalografickém výbrusu
b) na snímku hluboko leptané LČG ze SEM elektronového mikroskopu [13]*

2.1.2. Základní kovová hmota

Struktura základní kovové hmoty je dána v litém stavu chemickým složením litiny a řízením krystalizace (rychlost tuhnutí a chladnutí...) popřípadě následným tepelným zpracováním. Výsledkem může být matrice tvořená feritem, feritem a perlitem, perlitem, u vysokolegovaných litin austenitem a u izotermicky kalených litin ausferitem. LČG tedy není pouze jedním materiálem, ale celou skupinou materiálů s širokou škálou mechanických vlastností.



Obr.3. Přehled základních mechanických vlastností jednotlivých druhů litin a oceli na odlitky

2.2. MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Stejně jako u ostatních druhů litin má i zde zásadní vliv na hodnoty mechanických vlastností tvar vyloučeného grafitu. Ten totiž v základní kovové hmotě působí jako koncentrátor napětí (vrub). Útvary červíkovitého grafitu jsou oproti lupínkovému kratší a mají zaoblené konce, narušují tedy strukturu základní kovové hmoty výrazně méně než grafit lupínkový. Tomu odpovídají i hodnoty mechanických vlastností, které se pohybují v oblasti mezi LLG a LKG.

Jak již bylo zmíněno, LČG obsahuje díky své povaze a způsobu výroby i určité množství grafitu kuličkového, množství kuličkového grafitu potom výrazně ovlivňuje veškeré mechanické i fyzikální vlastnosti. Se stoupajícím podílem kuličkového grafitu ve struktuře roste pevnost a tuhost litiny, ale na úkor zhoršujících se technologických vlastností, tepelné vodivosti a obrobitelnosti.

Pro konstruktéry jsou při výběru vhodného materiálu důležité především pevnost, mez kluzu, rázová houževnatost, tvrdost a únavové a útlumové vlastnosti. Pro některé aplikace jsou však důležité i vlastnosti fyzikální jako teplotní roztažnost, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita, hustota, elektrické a magnetické vlastnosti. Tato část práce tedy uvádí některé mechanické a fyzikální vlastnosti LČG.

Hodnoty mechanických vlastností podle navrhované normy ISO/DIS 16112, která stanovuje minimální hodnoty mechanických vlastností LČG u samostatně odlévaných zkušebních tělísek uvádí *tab.2*.

Tab.2. Hodnoty mechanických vlastností LČG podle ISO/DIS 16112 (hodnoty tvrdosti jsou uváděny pouze jako orientační)

Označení litiny	R_m [MPa] min.	$R_{p\,0,2}$ [MPa] min.	A [%] min.	Typická tvrdost [HB]
ISO 16112 / JV / 300 / S	300	210	2,0	140 až 210
ISO 16112 / JV / 350 / S	350	245	1,5	160 až 220
ISO 16112 / JV / 400 / S	400	280	1,0	180 až 240
ISO 16112 / JV / 450 / S	450	315	1,0	200 až 250
ISO 16112 / JV / 500 / S	500	350	0,5	220 až 260

Tab.3 popisuje hodnoty mechanických vlastností litiny v závislosti na obsahu zrnitého grafitu (popř. na výskytu lupínkového grafitu) a v závislosti na obsahu perlitu ve struktuře. Záporné hodnoty ve sloupečku procentuálního obsahu zrnitého grafitu ukazují na výskyt lupínkového grafitu. Hodnota -5 v tabulce odpovídá 100% lupínkového grafitu a hodnota -3 odpovídá občasným oblastem s výskytem lupínkového grafitu.

Zejména proto, že LČG se používá převážně pro tepelně a mechanicky namáhané odlitky, jsou zajímavé hodnoty mechanických vlastností při zvýšené teplotě.

V *tab.4* je uvedeno průměrné chemické složení taveb, ze kterých byly odlévány zkušební vzorky pro *tab.2*.

Tavby byly prováděny v 6-ti tunové středofrekvenční peci, modifikovány předslitinou FeSiMg. Zkušební vzorky byly obrobena z tyčí podle ASTM A 536.

Tab.3. Hodnoty mechanických vlastností LČG v závislosti na obsahu zrnitého grafitu a obsahu perlitu ve struktuře [1,13]

Zrnitý grafit [%]	Obsah perlitu [%]	Tvrdost [HB] při 25°C	Rm [MPa]		E [GPa]		A [%]	
			25°C	300°C	25°C	300°C	25°C	300°C
4	25	158	298	270	138	139	4,0	1,6
4	45	174	340	303	137	130	3,5	1,1
8	50	200	332	299	143	-		1,5
7	75	219	435	377	147	132	3,5	1,4
6	94	234	475	429	147	132	1,5	1,0
33	87	239	567	497	162	136	4,3	3,3
80	90	239	715	626	168	159	5,8	4,2
-3 (lupín. grafit)	86	202	300	242	120	84	2,8	0,9

Tab.4. Chemické složení taveb z Tab.2. [1,13]

Zrnitý grafit [%]	Obsah perlitu [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	Mg [%]	Cu [%]	Sn [%]
4	25	3,63	2,49	0,42	0,014	0,007	0,42	0,039
4	45	3,54	2,49	0,41	0,010	0,007	0,40	0,040
8	50	3,54	2,50	0,41	0,012	0,010	0,41	0,040
7	75	3,61	2,49	0,40	0,014	0,008	0,45	0,053
6	94	3,59	2,48	0,39	0,013	0,011	0,71	0,094
33	87	3,57	2,50	0,40	0,011	0,023	0,41	0,039
80	90	3,58	2,50	0,39	0,012	0,030	0,72	0,095
-3 (lupín. grafit)	86	3,60	2,45	0,40	0,014	0,008	0,45	0,051

2.2.1. Únavové vlastnosti

Stejně jako hodnoty meze pevnosti i mez únavy je funkcí mikrostruktury a chemického složení materiálu. Proto by únavové vlastnosti materiálů měly být vždy doplněny popisem jejich mikrostruktury.

Podle dat uvedených v [13,16] zaměřených na mez únavy při střídavém ohybu za rotace, je mez únavy perlitické LČG zhruba dvojnásobná než u perlitické LLG a velmi blízká feritické LKG. Hodnota meze únavy feritické LČG je zhruba o 25% nižší než u LČG s perlitickou maticí.

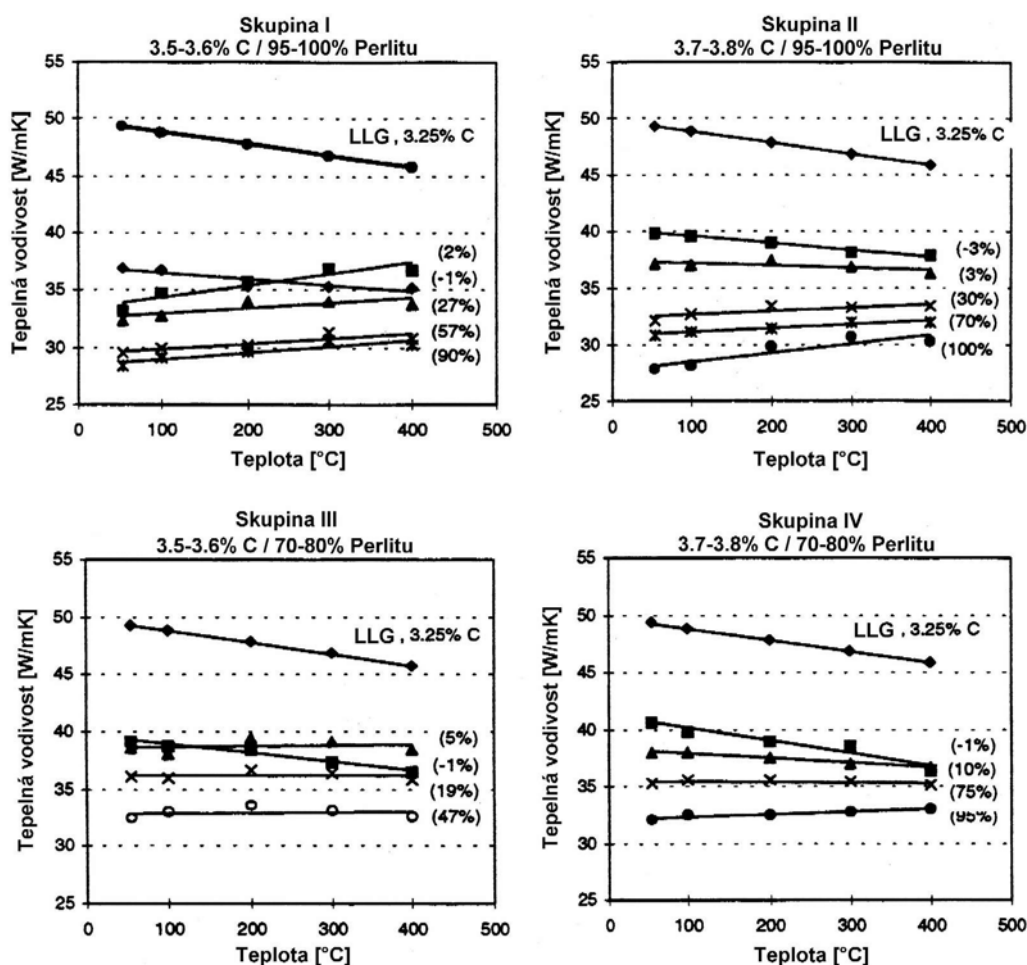
Výrazně vyšší hodnoty meze únavy oproti LLG vychází z morfologie červíkovitého grafitu. Zaoblené konce grafitových částic nepřispívají k iniciaci trhlin a naopak brzdí propagaci již vzniklých trhlin. Složité tvary a nepravidelný povrch grafitových útvarů představují složitější cestu pro šíření trhlin, než je tomu u hladkých deskovitých útvaru grafitu u LLG. Díky tomu jsou hodnoty únavových vlastností LČG za zvýšených teplot 2 až 4 krát vyšší než u LLG [13].

Pro použití v automobilovém průmyslu je velmi důležitá kombinace dobrých mechanických vlastností s některými výhodnými fyzikálními vlastnostmi LČG. V tomto smyslu je velmi důležitá tepelná vodivost a schopnost tlumit vibrace.

2.2.2. Tepelná vodivost

Protože tepelná vodivost je u grafitu několikanásobně větší než u základní kovové hmoty, je tepelná vodivost litin určena především množstvím a tvarem grafitu. *Obr.4* uvádí výsledky měření tepelné vodivosti litin v Rakouském slévárenském institutu (Osterreichisches Giesserei-Institut, Leoben). Zajímavým poznatkem je, že tepelná vodivost LLG se vzrůstající teplotou klesá, zatímco u LČG a LKG s teplotou roste. Z grafů je dobře patrné, že tepelná vodivost LČG je při pokojové teplotě o přibližně 25% nižší než tepelná vodivost LLG, a zhruba o 15 až 20% nižší při teplotě 400°C. Celkově tepelná vodivost litiny znatelně klesá s rostoucím obsahem kuličkového grafitu.

Pro použití u součástí s vysokými nároky na tepelnou vodivost materiálu, např. bloky spalovacích motorů, brzdové kotouče a bubny, je tedy důležité držet obsah zrnitého grafitu co nejnižší, ale zároveň se vyvarovat výskytu lupínkového grafitu kvůli výraznému poklesu pevnostních hodnot.

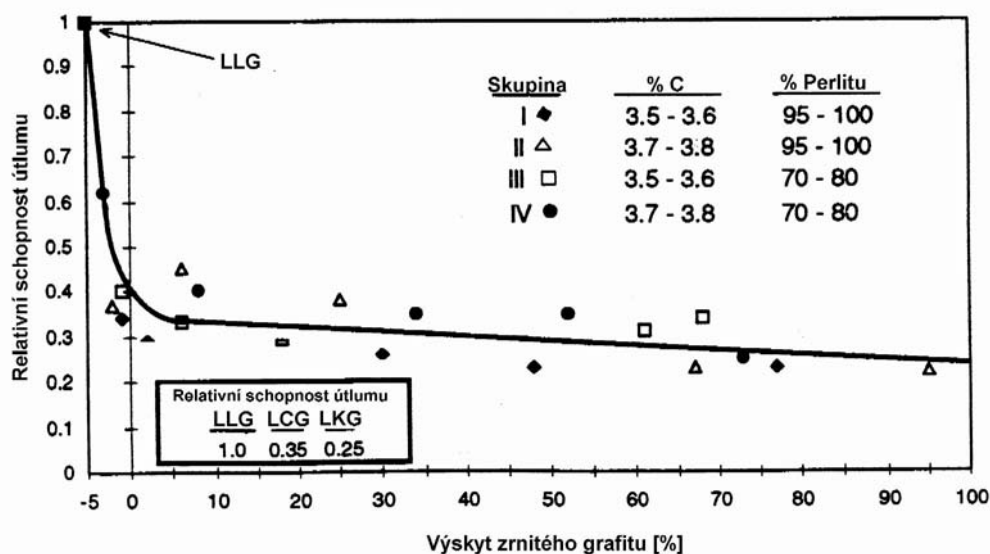


Obr.4. Hodnoty tepelné vodivosti LČG v závislosti na množství zrnitého grafitu, obsahu uhlíku a obsahu perlitu [13]

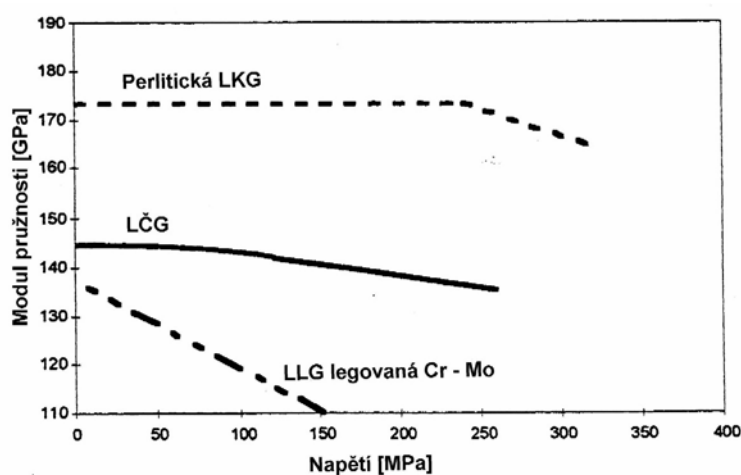
2.2.3. Tlumící schopnosti

Tlumící schopnost vztahovaná k hodnotám útlumu LLG je pro materiály v pořadí LLG:LČG:LKG podle různých zdrojů a různých způsobů měření uváděna takto: 1:0,35:0,22 [1] nebo 1:0,6:0,34 [2]. Obr.5. ukazuje výsledky měření tlumících schopností litin podle [13].

Přestože je schopnost útlumu u LČG menší než u LLG, tak se díky vyšším hodnotám modulu pružnosti viz. obr.6 posouvají rezonanční frekvence o 8 až 18% k vyšším hodnotám a výsledná hlučnost motoru z LČG je o 1,0 až 1,5 dB nižší [13,17].



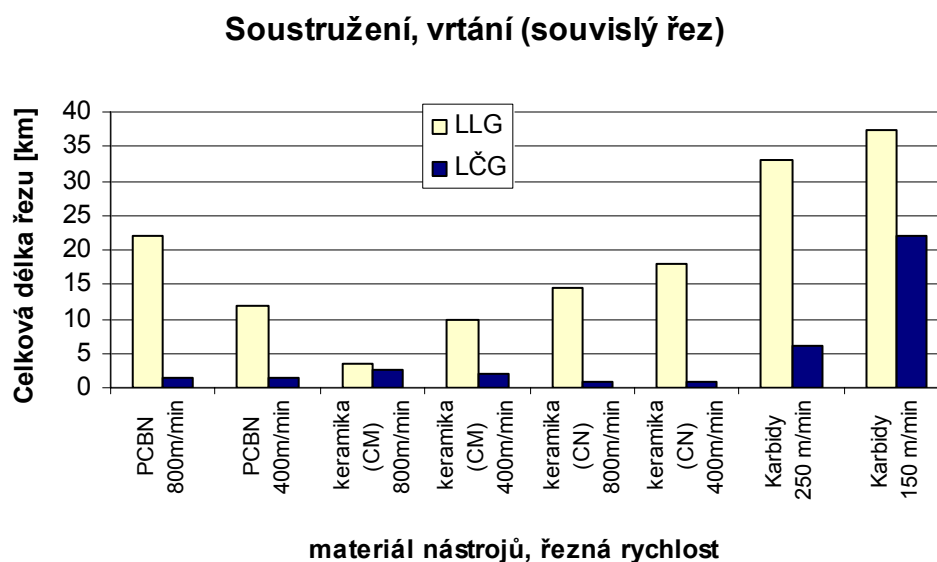
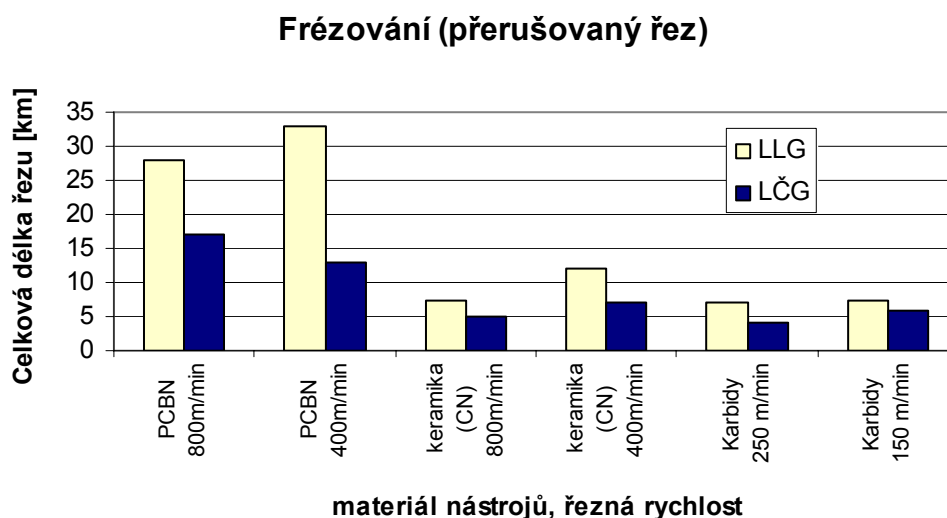
Obr.5. Tlumicí schopnosti litiny v závislosti na tvaru vyloučeného grafitu [13]



Obr.6. Závislost modulu pružnosti na napětí pro různé druhy litiny [13]

2.3. OBROBITELNOST

Podstatně vyšší pevnost a tuhost LČG oproti litině s lupínkovým grafitem v důsledku způsobuje, že její obrobitelnost je znatelně horší než obrobitelnost LLG. Jak ukazuje *obr.7* při použití karbidových nástrojů a nižší řezné rychlosti dosahuje životnost těchto nástrojů při obrábění LČG zhruba 50 až 70% životnosti ve srovnání s obráběním LLG. Horší je situace u vyšších řezných rychlostí a použití nástrojů s PCBN nebo keramickými destičkami. Největší pokles životnosti nástrojů je u soustružení a vrtání – technologií s nepřerušovaným řezem a použití keramiky a PCBN a současně vysokých řezných rychlostí.



Obr. 7. Srovnání obrobitelnosti LČG a LLG z hlediska životnosti nástrojů v závislosti na materiálu nástroje a řezné rychlosti [21]

Ačkoliv je obrobitelnost LČG v porovnání s LLG podstatně horší, stále je výrazně lepší než obrobitelnost LKG.

Z důvodů vzniku karbidů a karbonitridů titanu a tím radikálního zhoršení obrobitelnosti, se všeobecně nedoporučuje použití Ti při výrobě LČG.

V souvislosti s obrobitelností je zajímavé zmínit LKG s vysokým obsahem Si (3–4%). Odlitky z této litiny mají výhradně feritickou matici a dosahují nízké tvrdosti s velmi malou odchylkou +/- 5 HB ve všech částech odlitku s různou tloušťkou stěn. To umožňuje jejich snadné a efektivní obrábění.

2.4. SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI LČG

Sklon LČG k zákalice je závislý na typu použitého modifikátoru. Při modifikaci neseparovanými kovy vzácných zemin (KVZ) sklon k tvorbě zákalky značně vzrůstá [3,4]. Lepší je situace při použití komplexních modifikátorů. Díky menším množstvím použitého modifikátoru je sklon k tvorbě zákalky menší než u LKG. Při odlévání zejména tenkostěnných odlitků je třeba litinu důkladně očkovat.

Zabíhavost LČG je za jinak stejných podmínek (chemické složení, teplota lití, forma) shodná se zabíhavostí LLG [4].

Sklon k tvorbě staženin - LČG má spíše tendenci vytvářet soustředěnou staženinu nežli řediny. Při srovnání s LLG a LKG je objem staženiny jen nepatrně větší než u LLG [4,22], takže většinu odlitků lze vyrábět bez nálitků.

Litina s červíkovitým grafitem spojuje do značné míry slévárenské a mechanické vlastnosti LLG a LKG a je určitým kompromisem mezi oběma krajními typy litin určenými tvarem grafitu.

2.5. KRYSTALIZACE LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

Přestože technologie umožňující výrobu LČG byly známy již několik desítek let, nejasnosti týkající se mechanismu krystalizace grafitu, kinetiky působení modifikátorů a očkovačů přetrvávají dodnes. Existuje mnoho teorií a modelů růstu kompaktních forem grafitu, nicméně stále nepanuje mezi autory shoda nad platností jednotlivých hypotéz. Tématem krystalizace a kinetiky růstu červíkovitého grafitu se zabývalo mnoho prací u nás [5,6,7] i ve světě [8,9] a společně s nejnovějšími poznatky skandinávských autorů [14,18] lze výsledky těchto výzkumů formulovat následujícím způsobem.

Tuhnutí litin sestává ze dvou po sobě jdoucích procesů – krystalizace primární fáze a eutektické fáze krystalizace. Krystalizace eutektika není pokračováním krystalizace primární fáze, nýbrž se jedná o zcela samostatný proces, který je ovšem primární fází ovlivněn - např. vymezením prostoru pro vznik eutektika, obohacením zbylé taveniny o minoritní prvky v důsledku segregace z primární fáze apod. Každý z těchto krystalizačních dějů je zahájen nukleací příslušné fáze a jejím následným růstem.

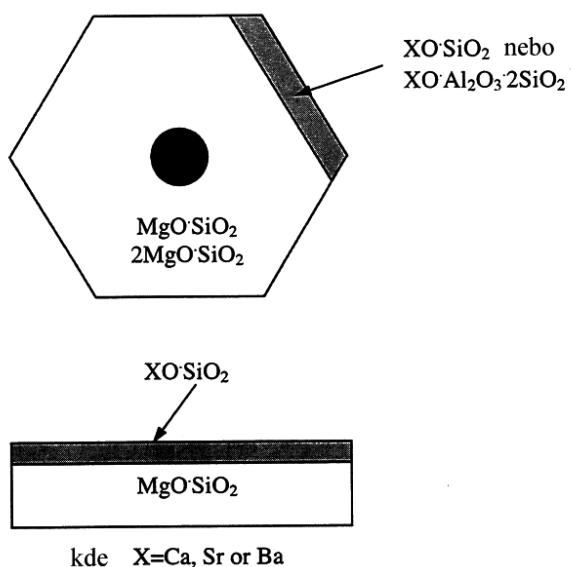
2.5.1. Krystalizace austenitu

U podeutektické litiny s červíkovým/kuličkovým grafitem je krystalizace zahájena tvorbou primárních dendritů austenitu. Osy dendritů se obohacují grafitotvornými prvky, karbidotvorné prvky se přesunují do mezidendritických prostorů a do zbytkové taveniny. Tak dojde k tomu, že tavenina připravená k eutektické krystalizaci je ve srovnání s nominálním složením litiny ochuzena o prvky grafitotvorné a naopak obohacena prvky karbidotvornými. Z tohoto důvodu se pro odlitky z LČG používá litina eutektického nebo mírně nadeutektického složení. Krystalizací dendritů austenitu dochází k růstu koncentrace uhlíku v tavenině do té doby, než dosáhne eutektického složení. Poté již po dosažení eutektické teploty probíhá eutektická reakce.

2.5.2. Krystalizace grafitu

U nadeutektické litiny je primární krystalizující fází grafit. Panuje všeobecná shoda, že grafit krystalizuje na heterogenních zárodcích přítomných v tavenině. Podle [19,20,23] grafit krystalizuje na oxidických, sulfidických popřípadě oxisulfidických vměstcích, které obsahují Mg, Si, Ca, Al, Sr, Ce a kyslík a síru v různých poměrech. Těchto vměstků vzniká několik typů, ale pouze některé jsou díky podobnosti mřížkových parametrů schopny sloužit jako

krystalizační zárodky. Stavbu a složení těchto vhodných zárodků popisuje *obr.8*. Jádro zárodku je tvořeno částicemi $(\text{Mg,Ca})\text{S}$ nebo při použití očkovadla s obsahem Stroncía $(\text{Sr,Ca,Mg})\text{S}$, formuje se ihned po přidání očkovadla do taveniny a slouží jako heterogenní krystalizační zárodek pro obálku s hladkými rovinnými plochami tvořenou komplexními silikáty hořčíku jako jsou $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ a $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$. Autoři dále ukázali, že při použití vysoce efektivních očkovadel na bázi ferosilicia s obsahem dalších prvků X (kde $X = \text{Al, Ca, Sr, Ba}$) se na povrchu těchto vměstků formují komplexní silikáty ($\text{XO} \cdot \text{SiO}_2$ nebo $\text{XO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) s hexagonální mřížkou a že právě tato fáze je obzvláště vhodná pro následný růst grafitu.



Obr.8. Struktura heterogenních zárodků pro krystalizaci grafitu v modifikovaných litinách [14]

Silný efekt KVZ na vývin mikrostruktury u modifikovaných litin je znám již dlouhou dobu, ale přesný mechanismus jejich působení není stále přesně popsán. Malá množství KVZ se u litin přidávají pro zvýšení počtu grafítických částic a jejich rovnoměrné rozložení. Toto jejich působení lze pravděpodobně vysvětlit vysokou afinitou především Ce, La, Y ke kyslíku a síře, která je srovnatelná s afinitou Mg k těmto prvkům [23]. Přidáním KVZ do taveniny tedy vzniká velké množství sulfidů a oxisulfidů, které potom mohou sloužit jako heterogenní krystalizační zárodky pro grafit tak jak popisuje teorie výše.

Primární krystalizací grafitu se snižuje obsah uhlíku v tavenině do té doby než dosáhne eutektického složení. Po dosažení eutektické teploty již probíhá eutektická reakce.

2.5.3. Eutektická přeměna

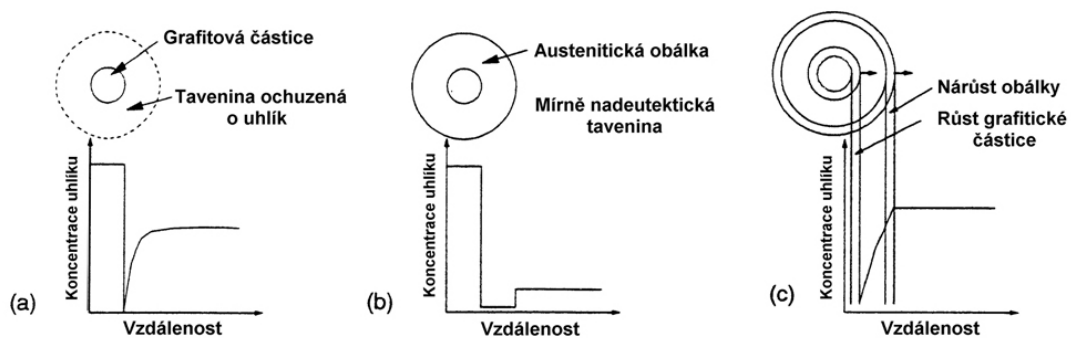
Za eutektické teploty dosáhne austenit mezní koncentrace, je v rovnováze s taveninou a probíhá eutektická přeměna, při které se tvoří stabilní eutektikum ve tvaru buněk, v jejichž středu roste z krystalizačních zárodků zrno grafitu. To k sobě přitahuje uhlík a vytěsňuje železo, popřípadě i v něm rozpuštěné prvky, do taveniny. Vrstva taveniny kolem zrna grafitu má velký sklon k tuhnutí, neboť je vlivem sníženého obsahu uhlíku silně konstitučně přechlazená a v určitém stadiu růstu z ní vznikne austenitická obálka zrna grafitu. Její tloušťka závisí na rychlosti tuhnutí. Při pomalém tuhnutí může uhlík difundovat ze vzdálenějších míst taveniny a ochuzená vrstva (austenitická obálka) se vytvoří později, tím je umožněn vznik relativně velkých útvarů grafitu. Vznikající eutektická směs austenitu a eutektického grafitu se nazývá grafitické eutektikum a vyplňuje prostor mezi krystaly primární fáze. V dalším stadiu eutektické krystalizace se růst grafitu značně zpomalí, neboť je omezován austenitickou obálkou. Právě ta má podle většiny autorů [5,6,7,8] zásadní vliv na růst červíkového grafitu.

Autoři na základě experimentů, kdy vzorky byly v různých etapách tuhnutí extrémně rychle ochlazovány, takže útvary grafitu a jejich okolí zůstaly „fixovány“ dospěli k závěru, že primární tvar formujícího se grafitu je nodulární a růst grafitu lze na základě změn v charakteru mezifázového kontaktu austenitu, grafitu a taveniny rozdělit do tří charakteristických etap:

V první etapě je vysoký plošný rozsah mezifázového kontaktu mezi grafitem a taveninou. Červíkovitý grafit roste svými výběžky na mezifázovém rozhraní austenitu a taveniny, kde jsou příznivé podmínky pro jeho krystalizaci.

V následující etapě růstu eutektický austenit uzavírá a izoluje větve červíkového grafitu od plošného kontaktu s taveninou. Spojení s taveninou si udržují pouze konce větví grafitu. Tento způsob růstu vede k prodloužení útvarů grafitu.

Pro třetí etapu je charakteristická úplná izolace větví červíkovitého grafitu od taveniny eutektickým austenitem. Spojení grafitu se zbytkovou taveninou je udržováno pouze nespojitostmi austenitické obálky – tzv. kanálky. Tyto kanálky představují místa zvýšené difúzní schopnosti uhlíku a přispívají k hrubnutí větví grafitu.



Obr.9. Izotermický růst grafitu a austenitické obálky. a) Růst grafitové kuličky v kontaktu s taveninou. b) Obalení grafitu austenitickou obálkou. c) Růst kuličkového grafitu uvnitř austenitické obálky[14]

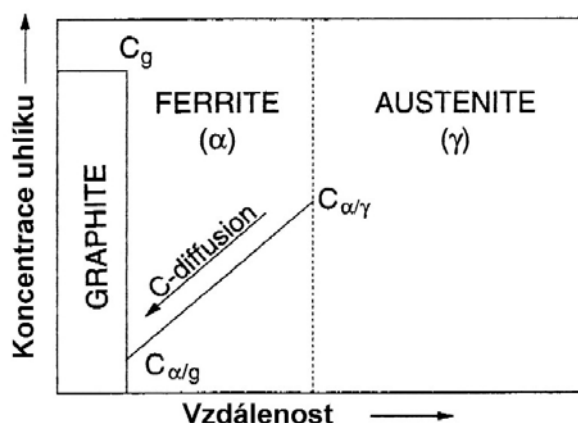
Dále autoři [5,7] z provedených experimentů dospěli k poznatku, že počet grafitických částic v modifikované litině se během eutektické přeměny zvyšuje jen mírně a je tedy určen počtem částic přítomných v tavenině před zahájením eutektické přeměny. Tento počet se v první polovině eutektické reakce téměř nezvyšuje. K intenzivnímu nárůstu počtu částic dochází až v závěru eutektické reakce. Při sledování časové závislosti tvorby červíkovitého grafitu potvrdili skutečnost, že k tvarovému vývinu částic červíkovitého grafitu dochází až v druhé polovině časového průběhu eutektické reakce, což potvrzuje dominantní vliv deformačního účinku austenitické obálky na tvar grafitové částice.

Tyto poznatky do značné míry objasňují výskyt kuličkového grafitu v tenkých stěnách odlitků z LČG.

2.5.4. Přeměny v tuhém stavu

Po ukončení tuhnutí rozpustnost uhlíku v austenitu s teplotou klesá a přebytečný uhlík se při chladnutí připojuje k již existujícím útvarům grafitu, čímž dochází k jejich dalšímu růstu. Jedná se o difúzní jev. Hnací silou tohoto růstu je tedy pokles rozpustnosti uhlíku v austenitu s teplotou. Při dalším ochlazování pod teplotu A_1 se austenit stává termodynamicky nestabilní a dochází k eutektoidní přeměně. Při ní jsou částice grafitu obklopeny feritickou obálkou, která je v kontaktu s metastabilním austenitem - obr.9. Celá reakce je řízena rychlostí difúze uhlíku skrz feritickou obálku. Reakce v podstatě sestává ze dvou souběžných jevů – vývinu feritu, který je zde stabilní fází a vývinu perlitu, který je metastabilní fází.

Pokud tedy reakce probíhá za stabilních podmínek, difúzí uhlíku k útvarům grafitu vznikají v austenitu oblasti ochuzené o uhlík vhodné pro krystalizaci feritu, který roste jako obálka kolem útvarů grafitu. Pokud je rychlost ochlazování příliš vysoká a nedojde ke kompletní přeměně dříve než teplota poklesne pod teplotu metastabilní přeměny, dochází ke krystalizaci perlitu, který poté roste zároveň s feritem.



Obr.10. Schéma rozložení uhlíku ve feritu během eutektoidní přeměny [14]

Z popsaného je patrné že obsah feritu ve struktuře litiny závisí na jejím chemickém složení, na rychlosti ochlazování v oblasti teplot eutektoidní přeměny a na celkovém množství grafitu a počtu grafítických částic ve struktuře. Výsledkem pomalejšího ochlazování v rozpětí teplot eutektoidní přeměny je tedy vyšší podíl feritu ve struktuře. Dále bylo prokázáno že zvýšení počtu částic grafitu v jednotkovém objemu při zachování celkového množství grafitu, chemického složení a rychlosti ochlazování, vede také k nárůstu podílu feritu ve struktuře.

2.6. METALURGIE LČG

Výroba LČG je natolik složitou záležitostí, že pro produkci odlitků z tohoto materiálu neexistuje jednotná technologie. Každý odlitek díky různé tloušťce stěny a nárokům na jeho budoucí uplatnění vyžaduje specifický postup výroby. Pro zvládnutí metalurgie LČG je důležité pochopení celého procesu krystalizace.

Stejně jako u ostatních typů litin ovlivňuje výslednou strukturu litiny během tuhnutí a chladnutí mnoho faktorů, které lze shrnout do 4 základních skupin:

- a) vliv chemického složení
- b) vliv ochlazovací rychlosti ochlazování při tuhnutí a chladnutí
- c) vliv zárodečného stavu taveniny (procesy modifikace a očkování taveniny)
- d) vliv tepelného zpracování

Rozhodujícím krokem pro získání červíkovitého grafitu je proces modifikace taveniny základního kovu. Na správný průběh tohoto pochodu má vliv celá řada faktorů, které jsou navzájem úzce provázány. Je zde vliv vsázkových a přísadových surovin, což se projevuje na chemickém složení taveniny, jejím zárodečném stavu a obsahu škodlivých látek, dále vliv aktivity kyslíku v tavenině, vliv druhu modifikátoru a s ním související modifikační postup.

2.6.1. Modifikace

Proces modifikace je rozhodujícím faktorem pro získání červíkovitého grafitu. Modifikací u grafitických litin ovlivňujeme tvar grafitu při jeho krystalizaci, takže místo grafitu lupínkového dostáváme kompaktnější tvary grafitu.

Podle prací [3,7,8,9,14,19,20] modifikační prvky vpravené do taveniny mají dva důležité souběžné účinky:

- 1) díky svojí vysoké afinitě ke kyslíku a síře, nejprve způsobí desoxidaci a odsíření taveniny, jejímž výsledkem je množství nekovových vměstků, které později fungují jako krystalizační zárodky pro grafit.
- 2) ve zbytkovém množství pak modifikační prvky ovlivňují kompaktnost austenitické obálky a mají zásadní vliv na rychlost růstu zárodků grafitu a tvar krystalizační fronty.

V současnosti existují v podstatě 4 praktické způsoby modifikace LČG podle použitého modifikátoru:

1. neseparovanými kovy vzácných zemin (KVZ)
2. nedokonalá modifikace Mg
3. komplexními slitinami na bázi Mg-KVZ
4. komplexními slitinami Mg-KVZ-Ti

2.6.1.1. Modifikace neseparovanými kovy vzácných zemin (KVZ)

Vzhledem k nízké teplotě tání všech KVZ (790-850°C) a vysokému bodu varu (3000°C) se modifikátor snadno rozpouští a průběh modifikace není nijak bouřlivý a nevyžaduje žádné speciální metody ani opatření. Obsah S v tavenině má být nízký, nejlépe pod 0,02%. Všechny KVZ mají vysokou afinitu ke kyslíku i síře, takže množství modifikátoru se užívá přímo úměrně obsahu S v tavenině a musí být odzkoušeno podle složení základního kovu a způsobů zpracování. Výhodou použití KVZ je výsledné pravidelné rozložení a velikost útvarů kompaktního grafitu. Nevýhodou je velká citlivost taveniny na množství modifikátoru, při použití nadměrného množství modifikátoru dochází k výskytu "chunky" grafitu a následnému poklesu hodnot mechanických vlastností a zvyšuje se sklon ke vzniku karbidů při krystalizaci tenkých stěn odlitku. Proto je nutné k modifikaci používat co nejmenší množství modifikátoru a taveninu po modifikaci intenzivně grafitizačně očkovat, nejlépe 0,3 až 0,8% vysoce efektivního očkovačla (s obsahem Sr, Ca, Ba...). Sклон k zákalce je výrazně závislý na uhlíkovém ekvivalentu litiny [4,10,14]. Proto je doporučováno nadeutektické složení základního kovu s uhlíkovým ekvivalentem $CE = 4,3$ až $4,5$.

Tab.5. Fyzikální a chemické vlastnosti některých KVZ

Prvek	Značka	Atomové číslo	Atomová hmotnost	Hustota [kg/dm ³]	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]
Lanthanum	La	57	138,9	6,15	918	3464
Cerium	Ce	58	140,12	6,77	789	3443
Praseodymium	Pr	59	140,98	6,44	931	3520
Neodymium	Nd	60	144,24	7,01	1021	3074
Promethium	Pm	61	145	7,26	1042	3000
Samarium	Sm	62	150,4	7,52	1074	1794
Europium	Eu	63	151,96	5,2	822	1527
Gadolinium	Gd	64	157,25	7,9	1313	3273
Terbium	Tb	65	158,93	8,23	1356	3230
Dysprosium	Dy	66	162,5	8,55	1412	2567
Holmium	Ho	67	164,93	8,8	1474	2700
Erbium	Er	68	167,26	9,1	1529	2868
Thulium	Tm	69	168,93	9,34	1545	1950
Ytterbium	Yb	70	173,04	7	819	1196
Lutetium	Lu	71	174,97	9,84	1663	3402
Scandium	Sc	21	44,96	3	1541	2836
Yttrium	Y	39	88,91	4,47	1522	3338
Thorium	Th	90	232,04	11,8	1750	4850

2.6.1.2. Nedokonalá modifikace Mg

Dosažení struktury s 80 až 90% červíkovitého grafitu nedokonalou modifikací Mg nebo slitinami MgSi je v praxi velmi obtížné. Teplota varu Mg je 1102°C a při obvyklých modifikačních teplotách je rovnovážný tlak jeho par v tavenině velmi vysoký. Proces modifikace pomocí Mg je velice bouřlivý, doprovázený zvukovými a světelnými efekty a navíc dochází k značnému propalu a odpařování Mg. Nedá se proto do taveniny přidávat bez speciálních opatření. Právě díky propalu, ztrátám výparem (a s tím související rychlejší doznívání modifikačního účinku) a velké citlivosti na počáteční obsah S v tavenině je výroba LČG pomocí nedokonalé modifikace velmi obtížná.

2.6.1.3. Komplexními slitinami Mg-KVZ-Ti

Použití této metody je založeno na principu globulizačního působení Mg a anti-globulizačního působení Ti. Titan zamezuje vzniku kuličkového grafitu a ani předávkování Mg již nevede ke vzniku kuličkového grafitu. Vyšší použité množství Mg zamezuje výskytu lupínkového grafitu v litině, ale díky přítomnosti Ti nevede k vývinu kuličkového grafitu. To velmi zjednodušuje výrobu.

Značnou nevýhodou této metody je, že dojde ke znečištění vratné litiny titanem, což je nepříznivé z hlediska výroby LKG. Dalším problémem při použití Ti je vznik karbidů a karbonitridů titanu a tím radikální zhoršení obrobiteľnosti odlitků a životnosti obráběcích nástrojů.

Z uvedených důvodů se všeobecně nedoporučuje použití Ti při výrobě LČG

2.6.1.4. Komplexními slitinami na bázi Mg-KVZ

V současnosti nejpoužívanější způsob výroby LČG. Základem zpracování je vysoký obsah KVZ v křemíko-hořčíkové slitině. Příkladem může být modifikátor Compact Mag firmy Elkem, ten obsahuje 44 až 48% Si, 5 až 6% Mg, 5 až 7% KVZ. Dávkování modifikátoru musí být odzkoušeno podle složení základního kovu a způsobu zpracování a je individuální pro každou slévárnu. Základní složení tekutého kovu je doporučováno nadeutektické s CE=4,3 až 4,5 s nízkým obsahem nečistot [3,10].

2.6.2. Vliv aktivity kyslíku na průběh modifikace

Kovy vzácných zemin, stejně jako Mg, mají vysokou afinitu ke kyslíku i síře. Část prvků obsažených v modifikátoru se potom spotřebuje na dezoxidaci a rafinaci taveniny. Obsah O a S rozpuštěných v tavenině má tedy vliv na zbytkové množství KVZ, které je nutné pro krystalizaci grafitu v požadovaném tvaru. Vzhledem k tomu, že po modifikaci k dodatečnému nasíření již nedochází, je pro sledování efektivního působení modifikátoru zásadní vliv kyslíku, jehož obsah se může zvyšovat reoxidací.

Tato fakta byla částečně ověřena během předchozích prací na našem pracovišti TU v Liberci [11,12], kdy byla prokázána souvislost mezi aktivitou kyslíku naměřenou po modifikaci a efektivitou modifikace, tzn. výslednou strukturou grafitu při použití modifikátoru na bázi Mg.

2.6.3. Očkování

Vzhledem k tomu, že většina prvků používaných jako modifikační činidla v modifikátorech působí značně karbidotvorně, resp. stabilizují cementit, je při výrobě odlitků z LČG potřebné současně nebo následně po modifikaci provádět intenzivní grafitizační očkování.

Grafitizační očkování litiny v praxi znamená přidávání malého množství slitiny, která podporuje krystalizaci grafitu a tím zvyšuje grafitizační schopnost litiny. Účinnost očkovadla je dána jeho počáteční nukleační schopností a měrou jakou si udržuje efektivitu v časovém intervalu mezi provedením očkování a kompletním ztuhnutím odlitku.

Většina teorií popisujících princip očkování je založena na předpokladu, že grafit vzniká jako důsledek heterogenní nukleace na neželezných vměstcích během tuhnutí, kde prvky jako Ca, Ba a Sr hrají důležitou úlohu při nukleačním procesu – viz kapitola 2.6.2. Krystalizace grafitu. Podle těchto teorií jsou procesy modifikace a očkování velice úzce propojeny. Prvky s vysokou afinitou ke kyslíku a síře vnesené do taveniny během modifikace vytvoří základní nekovové vměstky na bázi sulfidů a oxidů. Na povrchu těchto vměstků potom při očkování vysoce účinnými očkovadly s obsahem Ca, Ba, Sr vznikají hexagonální silikáty, které mají velmi příznivý vliv na nukleaci grafitu během tuhnutí, což souvisí s jejich hexagonální krystalickou mřížkou, která je velmi podobná krystalické mřížce grafitu (malý energetický rozdíl).

Základem úspěšného očkování je tedy kvalitní modifikace.

Výsledkem očkování je redukce zákalky u tenkostěnných odlitků, rovnoměrnější jemnozrnná struktura litiny a tím ustálenější hodnoty mechanických vlastností a obrobitelnosti v různých tloušťkách stěn odlitku.

Jak je známo, efekt očkovadla s rostoucí očkovací teplotou a dobou po očkování klesá. S ohledem na to bylo vyvinuto několik metod očkování, které lze použít buď samostatně nebo v kombinaci a to v závislosti na podmínkách slévárny. Základní metody očkování jsou:

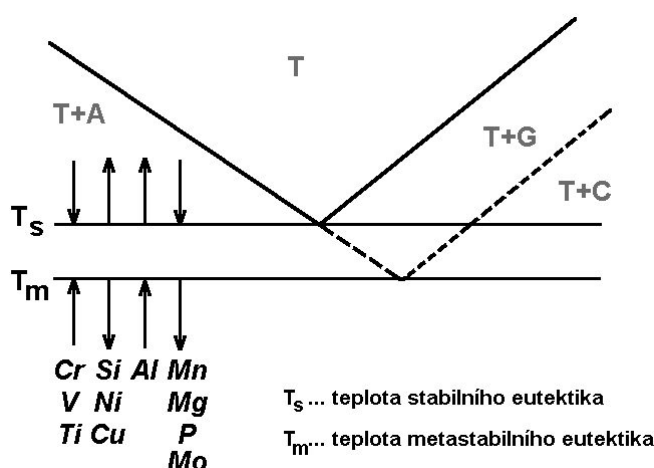
1. V pánvích
2. Do proudu kovu při lití nebo přelévání
3. Ve formě (In Mould)

2.6.4. Vliv chemického složení

Celkové doporučení pro výrobu modifikovaných grafitických litin je používat mírně nadeutektického složení taveniny, aby primární krystalizující fází při tuhnutí byl grafit.

Rozhodující pro grafitizační schopnost litiny je interval mezi stabilní a metastabilní teplotou. Teplota stabilního rovnovážného eutektika činí 1153°C, metastabilního 1147°C . Aktivace zárodků grafitu nepotřebuje velkou hodnotu podchlazení.

Při krystalizaci červíkovitého a kuličkového grafitu je však třeba hodnota podchlazení vyšší (tento poznatek je prakticky základem termické analýzy pro kontrolu jakosti litin). Pokud je podchlazení příliš vysoké, teplota taveniny dosáhne teploty nižší než je teplota metastabilní a tavenina bude krystalizovat bez vylučování grafitu. Proto prvky rozšiřující interval teplot stabilního (T_s) a metastabilního (T_m) eutektika budou podporovat grafitizaci a naopak. Vliv nejdůležitějších prvků ukazuje *obr. 11* [24].



Obr.11. Vliv prvků na šířku intervalu mezi teplotou stabilního a metastabilního eutektika [24]

Vysoký obsah Si v litině má tedy silný grafitizační účinek. Mimo to křemík působí značně feritotvorně při přeměnách v tuhém stavu. Je to tím, že s rostoucím obsahem Si se posouvá transformační teplota k vyšším hodnotám, rychlost adsorpce uhlíku na povrchu grafitové částice roste a při vyšší teplotě se také zvyšuje difúzní schopnost uhlíku. Tím v okolí grafitové částice vzniká oduhličená zóna – feritická oblast.

Naproti tomu Mn snižuje teplotu eutektoidní transformace, zužuje teplotní interval pro růst feritu a tím podporuje formování perlitu ve struktuře.

Perlitotvorný efekt Cu je vysvětlován tím, že měď kontaminuje povrch grafitu při jeho volném růstu v tavenině, což později vede ke snížení rychlosti ukládání uhlíku na povrchu

grafitu během vývinu feritu. Výsledkem je, že se během přeměny vyvine méně feritu a tím vznikne prostor pro růst perlitu [18].

3. SPECIFIKA VÝROBY TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z LČG

Většina problému při výrobě tenkostěnných odlitků z LČG plyne z vyšších ochlazovacích rychlostí, kterým je kov v tenkých stěnách vystaven. Rychlejší ochlazování taveniny klade nároky na úpravu chemického složení základního kovu takovým směrem, aby obsahoval méně karbidotvorných prvků a naopak zvýšené množství grafit stabilizujících prvků, především Si. Jinak v tenkých stěnách dochází k nežádoucímu výskytu zákalky, popř. odlitek krystalizuje celý podle metastabilní rovnováhy.

Značným problémem u tenkostěnných odlitků je jev, který má původ v samotné krystalizaci a způsobu růstu červíkovitého grafitu a tím je výskyt většího množství kuličkového grafitu. Při rychlém chladnutí taveniny dojde pouze k vývinu drobných zárodků ve tvaru kuliček, ale okolní austenitická obálka ztuhne příliš rychle a tím zabráni následnému tvarovému vývinu grafitových částic. Ty následně pouze zhrubnou vlivem difúzních pochodů v tuhnoucím a chladnoucím kovu. Výsledkem je velmi jemný kuličkový grafit ve struktuře odlitku a to i přesto, že tavenina obsahovala podstatně menší množství modifikátoru než je nutné pro výrobu kuličkového grafitu.

Dalším strukturním problémem tenkostěnných odlitků je prezence povrchové vrstvy s diametrálně odlišnou mikrostrukturou, než má zbytek odlitku. K tomu sice dochází i u silnostěnných odlitků, ale vzhledem k tloušťce této vrstvy a mohutnosti stěny s požadovanou strukturou, není tento jev tak významný. Jinak tomu je u odlitků s velmi tenkou stěnou (pod 5mm) kde již povrchová vrstva tvoří poměrně velkou procentuální část průřezu odlitku. Navíc je u tenkých stěn vliv formy a tím i její působení na povrch odlitku mnohem významnější protože poměr povrchu odlitku ku jeho objemu je zde mnohem vyšší, než u běžných odlitků.

Nemalým problémem je i zajištění správného a úplného zaplnění dutiny formy.

4. SHRNUTÍ LITERÁRNÍCH POZNATKŮ A JEJICH POUŽITÍ PŘI ŘEŠENÍ EXPERIMENTŮ

Prostudované literární podklady se celkově shodují na tom, že litina s červíkovitým grafitem spojuje do značné míry výhodné slévárenské, mechanické a fyzikální vlastnosti LLG a LKG. Tím se stává velmi příhodným a nepostradatelným materiálem pro výrobu specifických odlitků automobilového průmyslu. Použití tohoto materiálu je však limitováno potřebou vytvoření a udržováním produkčních podmínek aby byla zajištěna reprodukovatelnost výroby. Obtížnost zajištění přiměřené technologické jistoty a reprodukovatelnosti výroby LČG spočívá v tom že pásmo výskytu přechodového tvaru grafitu, tzv. „produkční okno“ je velmi úzké. Navíc jeho šířka je funkcí celé řady faktorů jako je vliv chemického složení taveniny, vliv druhu modifikátoru, obsah škodlivých látek, dále vliv aktivity kyslíku v tavenině, vsázky ale i různá tloušťka stěn na průřezu odlitkem a s tím spojená různá ochlazovací rychlost.

Celkově se autoři i zástupci průmyslu jako jsou firmy SinterCast a Elkem [1,10,13] shodují na tom, že:

- a) díky velké komplexitě problému krystalizace červíkovitého grafitu neexistuje jednotný technologický postup pro výrobu odlitků z LČG.
- b) pro každou kombinaci složení základního kovu, modifikátoru, očkovačla a způsobu zpracování musí být odzkoušeno dávkování modifikátoru a očkovačla a je tedy individuální pro každou slévárnu.
- c) všeobecně je doporučováno základní složení tekutého kovu nadeutektické s $CE=4,3$ až $4,5$, s nízkým obsahem nečistot [3,10] ale dostatečným obsahem síry nutným pro tvorbu krystalizačních zárodků pro grafit.
- d) očkování nezvyšuje počet potencionálních zárodků rozmístěných v LLG a LKG, ale modifikuje existující do aktivní formy. Důležitým úkolem pro efektivní očkování je vytvoření velkého množství nekovových mikročástic (sulfidy a oxidy) během zpracování hořčíkem nebo Kovy vzácných zemin při výrobě LČG.
- e) ideální zpracovací postup pro průmyslovou výrobu LČG je použití slitiny s obsahem Mg a Ce. Proces začíná předmodifikováním litiny, po němž následuje měření průběhu tuhnutí. Na základě těchto výsledků se provádí konečná modifikace a očkování litiny. Tento postup je vhodný pro slévárny, které mají stabilní provozní podmínky. Slévárny automobilového průmyslu s licími pecemi jsou pro tuto metodu ideální.
- f) pokud je technologie výroby dobře zvládnuta, nabízí LČG celou řadu výhodných vlastností, které jsou u některých aplikací automob. průmyslu nadřazené vlastnostem LLG popř. LKG.

5. NÁVRH METODIKY PRO VÝROBU A HODNOCENÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z LČG

Pro splnění cílů práce bylo potřeba provést množství taveb s cílem získat tenkostěnné odlitky s požadovanou strukturou – grafickou litinu s červíkovitým grafitem. Bylo tedy třeba navrhnout a posléze upravit technologii tavení a zpracování litiny, navrhnout vhodné zkušební odlitky, postup získání vzorků, dále jejich nejefektivnější zkoušení a vyhodnocení tak, aby byl získán co nejkomplexnější soubor informací.

Veškeré tavby byly provedeny v dílnách TU v Liberci, aby byly zaručeny konstantní podmínky a tím i opakovatelnost experimentů a dodržena čistota základního kovu s konstantním chemickým složením, nízkým obsahem nežádoucích prvků a byl tak vyloučen nechtěný vliv těchto prvků na průběh experimentů.

5.1. TAVÍCÍ A LICÍ ZAŘÍZENÍ A METODIKA TAVEB

Tavby byly prováděny v kelímkové středofrekvenční indukční peci s kyselou vyzdívkou, na maximální množství kovu 40 kg. Základní vsázku tvořily housky surového železa Sorel a ferosilicium FeSi75 pro zvýšení obsahu Si v základním kovu. Po natavení a dosažení teploty 1450 až 1480°C byla stažena struska a tavenina byla za účelem modifikace přelita do přehřáté zpracovací pánve. Modifikace byla prováděna polévací metodou v modifikační pánvi. Pro modifikaci pomocí KVZ není potřeba pánve s velkým poměrem výška/průměr, protože se modifikátor rozpouští naprosto klidně, pouze je třeba zajistit, aby modifikátor nevyplaval na hladinu a díky vysoké afinitě ke kyslíku nevyhořel, a aby nedošlo k jeho přilepení na pánve a horšímu rozpouštění. Toho bylo dosaženo jednoduchým postupem, kdy na dno pánve byla vsypána 1. dávka očkovačla - odměřené množství FeSi75, na tuto vrstvu byl umístěn modifikátor a přesypán pilinami z nelegované LLG. Modifikátor potom nevyplavával ani se nenalepoval. Zpracovaná tavenina byla po promíchání a zhruba dvouminutové prodlevě nutné pro dokonalé rozpuštění modifikátoru a správný průběh modifikace očkována 2. dávkou očkovačla (Superseed) a odlévala se při teplotě kolem 1400 °C přímo z modifikační pánve.

Odlévalo se do pískových forem, do jednotné formovací směsi používané ve slévárně Česká železářská společnost s.r.o. provozovna FEREX v Liberci. Směs je tvořena převážně vratným pískem, obsahuje vždy 2% nového křemenného ostřiva pro oživení, dále 7% bentonitu a 4 až 5% vody. Stěny formy byly kvůli snížení výskytu povrchových vad a zvýšení odolnosti formy opatřeny nástřikem vodního roztoku melasy.



Obr. 12. Použitá indukční pec a zpracovací pánev

5.2. POUŽITÉ SUROVINY

Vsázkový materiál byl pro všechny tavby shodný. Jednalo se o surové železo s velmi nízkým obsahem P a S s obchodním názvem SOREL. Chemické složení tohoto materiálu je v *tab.6*.

Grafitizační očkování se provádělo očkovadly Superseed a FeSi 75. Chemická složení očkovadel uvádí *tab.7*.

Jako modifikátor byla použita předslitina Cer-Mischmetall německého výrobce SKW GIESSEREI, chemické složení viz *tab.8*.

Tab.6. Chemické složení základního materiálu (SOREL)

obsah prvků [%]						
Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni
94,60	4,260	0,120	0,04	0,022	0,0730	0,007

Tab.7. Chemické složení očkovaadel

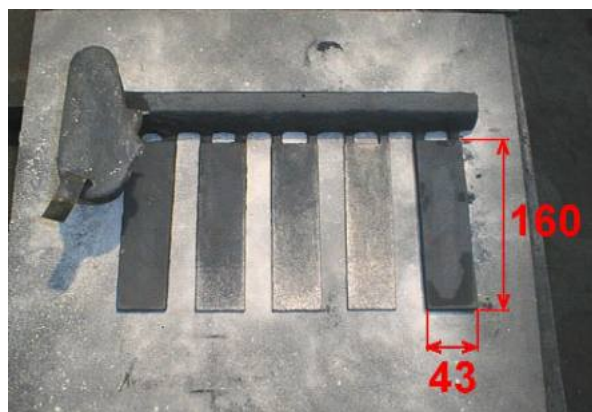
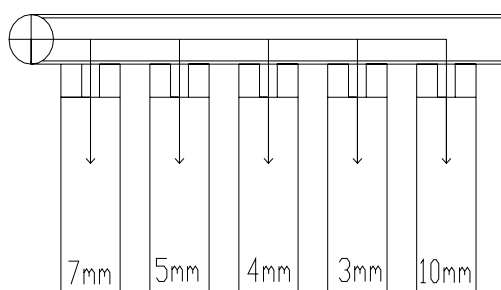
obsah prvků [%]							
	Fe	Si	Al	Ca	Sr	Mg	KVZ
FeSi 75	25	75	-	-	-	-	-
Superseed	zbytek	75	max. 0,5	0,1	0,8	-	-

Tab.8. Chemické složení předslitiny Cer-Mischmetall

obsah prvků [%]								
Ce	La	Nd	Pr	ostatní KVZ	Fe	Si	Mg	Al
50-53	20-26	15-19	4-7	cca. 3	cca. 0,5	cca. 0,3	cca. 0,3	cca. 0,2

5.3. ZKUŠEBNÍ ODLITKY A ZÍSKANÉ VZORKY

Při volbě zkušebního odlitku byl kladen důraz na jeho jednoduchost a přitom co nejvyšší vypovídací hodnotu, tak aby jeho následným zkoumáním byl získán co nejkomplexnější soubor informací. Navržený odlitek viz *obr.13* sestává z jednoduchých obdélníkových destiček rozměru 160 x 43 mm a různé tloušťky, připojených na společnou vtokovou soustavu.

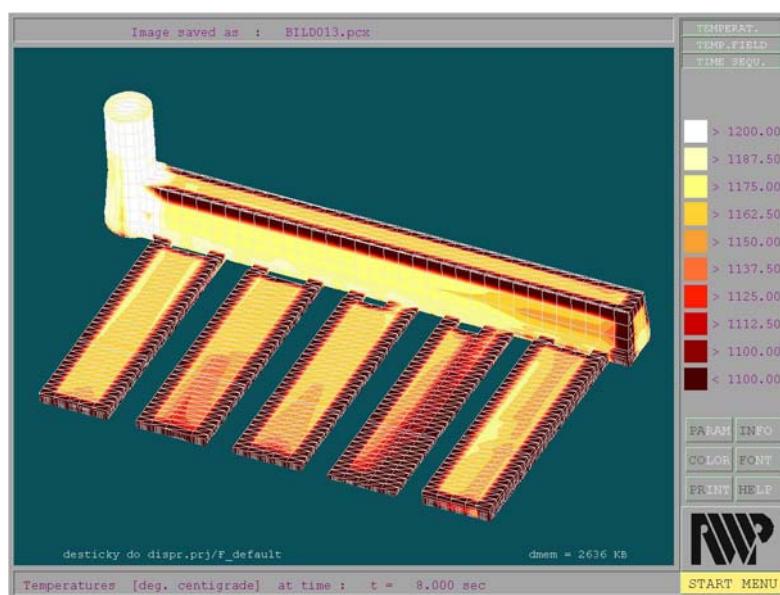


Obr. 13. Schéma a fotografie odlitku a jeho rozměrů

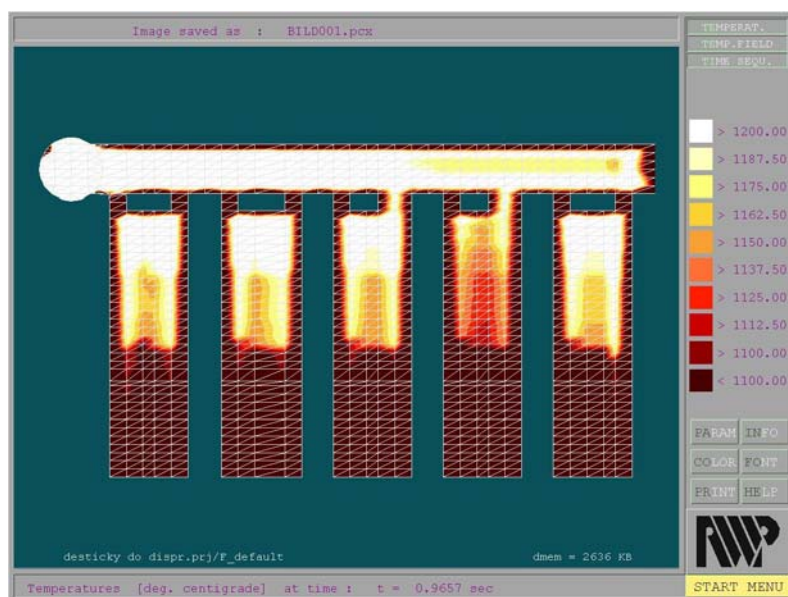
Pro optimalizaci zkušebního odlitku byl použit numerický simulační software Wincast založený na metodě konečných prvků. Cílem použití simulací bylo navrhnout:

- optimální rozložení destiček s ohledem na plnění formy a rovnoměrné teplotní pole
- velikosti zářezů, aby docházelo k současnému a rovnoměrnému plnění destiček
- dostatečnou licí teplotu s ohledem na úplné zaplnění formy a dosažení vhodných podmínek pro tuhnutí materiálu ve velmi tenkých stěnách.

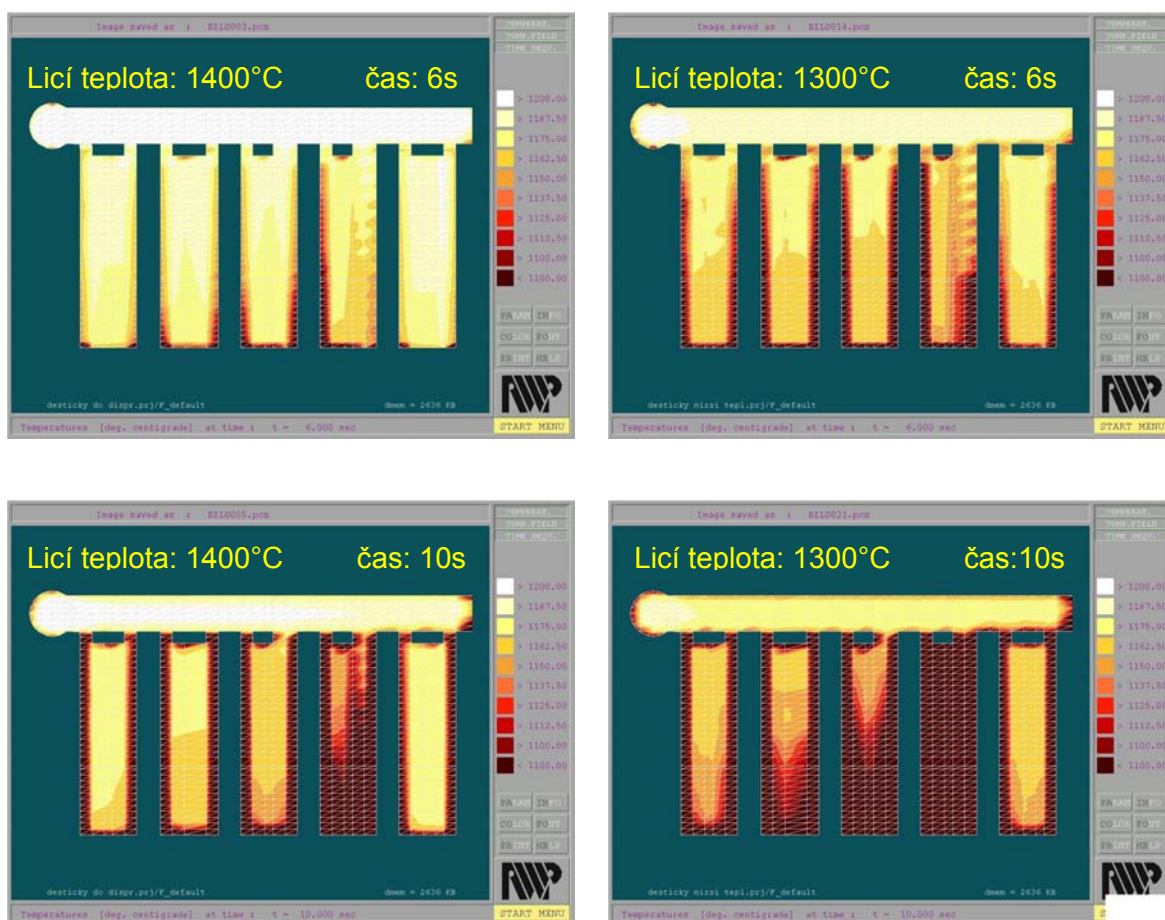
Za tímto účelem bylo provedeno několik simulačních výpočtů s různými velikostmi zářezů a různými licími teplotami. Na *obr.14* je 3D model výsledné varianty zkušebního odlitku i s rozložením teplotního pole 8 sekund od počátku lití. Na *obr.15* je snímek ze simulace plnění zkušebního odlitku s již upravenými zářezy, který ukazuje na horizontálním řezu tímto odlitkem v čase přibližně 1 s od počátku lití současné plnění všech tenkých destiček. Na dalších obrázcích (*obr.16*) je potom série snímků ukazující srovnání průběhů tuhnutí a teplotních polí na horizontálním řezu odlitkem při licích teplotách 1300°C a 1400°C. Na *obr.17* následuje srovnání křivek tuhnutí a chladnutí vždy dvou bodů na destičkách tloušťky 3 a 7mm při licích teplotách 1300 a 1400°C. Na křivkách je patrné, že při licí teplotě 1300°C dochází k tuhnutí destiček okamžitě po jejich naplnění a to by mohlo při náhodném poklesu licí teploty vést k nezaběhnutí tenkých destiček. Proto byla zvolena varianta s vyšší licí teplotou, která navíc zajistí výrazně pomalejší tuhnutí a tím umožní požadovaný tvarový vývin červíkovitého grafitu v tenkých stěnách.



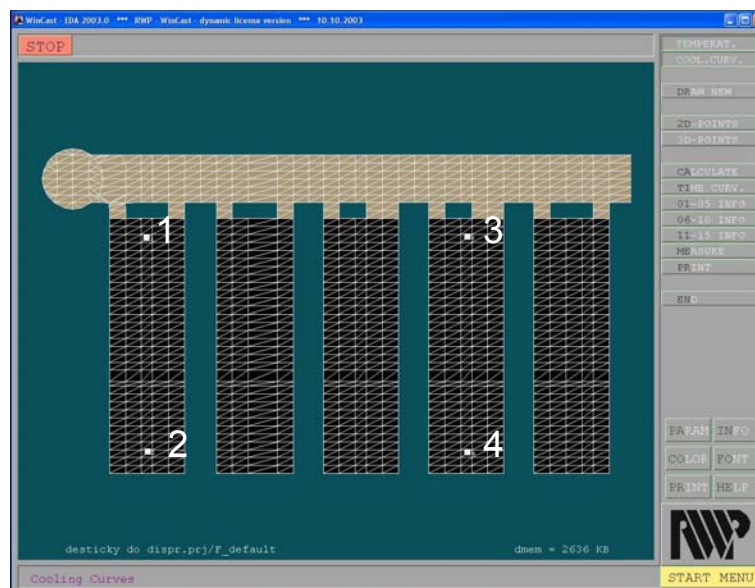
Obr.14. 3D model zkušebního odlitku i s rozložením teplotního pole 8 sekund od počátku lití



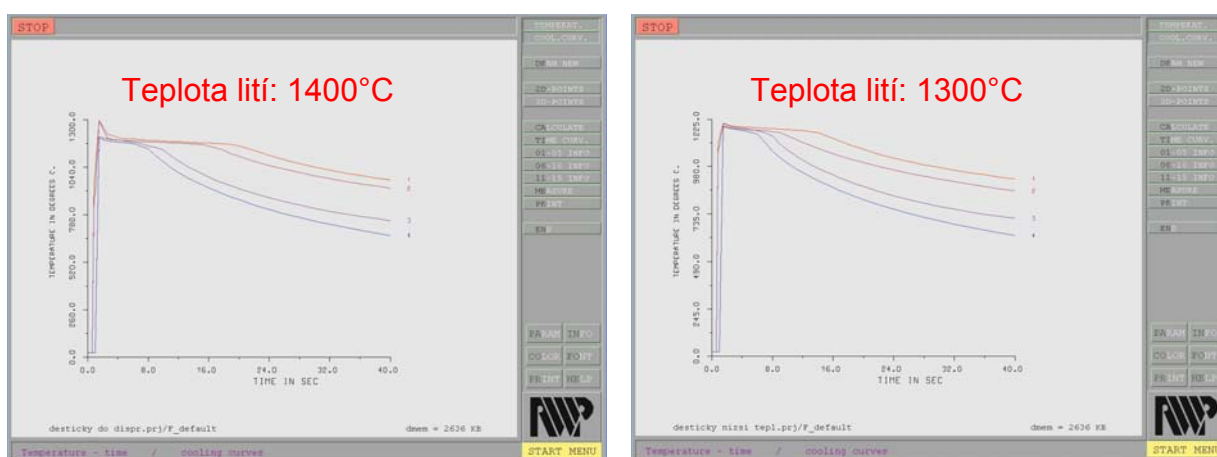
Obr.15. Snímek ze simulace plnění optimalizovaného zkušebního odlitku při počáteční lici teplotě 1400°C



Obr.16. srovnání průběhů tuhnutí a teplotních polí na horizontálním řezu odlitkem při licích teplotách 1300°C a 1400°C



Místa výpočtů křivek chladnutí

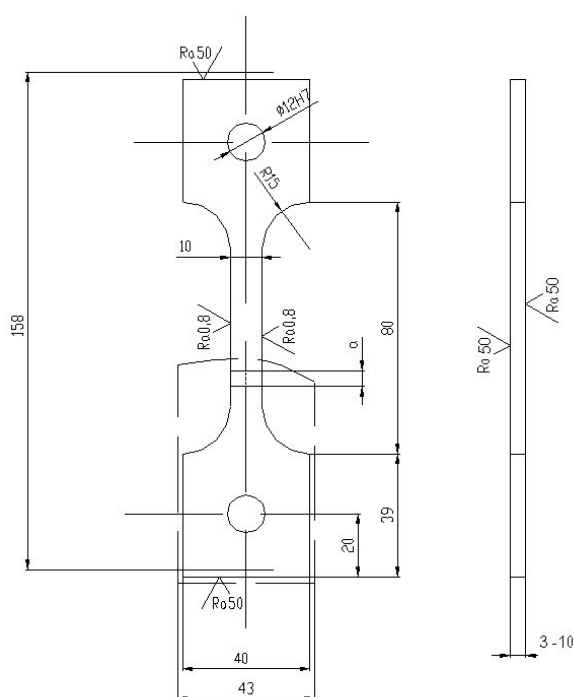


obr.17. Srovnání křivek tuhnutí a chladnutí vždy dvou bodů na destičkách tloušťky 3 a 7mm při lících teplotách 1300 a 1400°C

Toto uspořádání zkušebního odlitku také umožňuje snadné připojení nálitku definované velikosti ke každé destičce pro sledování vlivu průtočnosti kovu na kvalitu odlitku. Na získaných destičkách lze dobře sledovat vliv tloušťky stěny na strukturu a mechanické vlastnosti. Zkušební odlitky ve tvaru destiček byly zvoleny jednak proto, že umožňují snadný matematický popis tepelné bilance mezi odlitkem a formou, ale především proto, že z nich byly následně obráběny speciální vzorky pro trhací zkoušky. Tyto vzorky (obr.18) navržené Prof. Exnerem [30] si zachovávají specifikou povrchovou vrstvu tzv. „lící kůru“ a tím lépe popisují skutečné vlastnosti materiálu v extrémně tenkých stěnách kolem 3 až 5 mm.

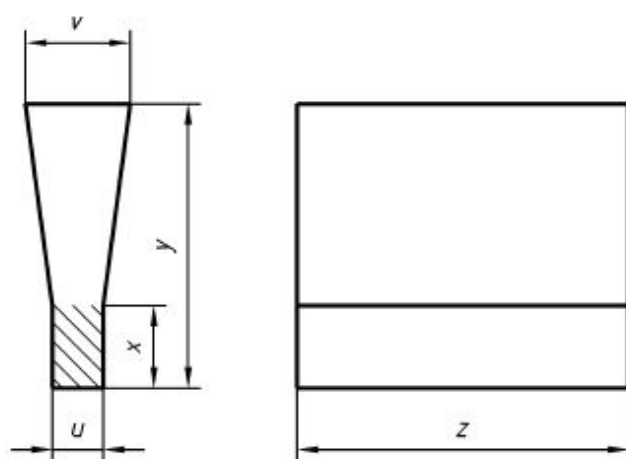
Aby bylo vůbec možné kvantifikovat vliv tloušťky stěny na strukturu a mechanické vlastnosti odlévané LČG byla dále odlévána normalizovaná zkouška podle ČSN EN 1563 pro LKG, která je shodná s navrhovanou ISO/DIS 16112 pro LČG tzv. Ypsilonová zkouška. Typ a rozměry tohoto odlitku viz *obr.19*.

Zachování povrchové vrstvy odlitku u zkušebních destiček a následné zkoušení těchto vzorků umožnilo porovnání hodnot mechanických vlastností materiálu z normalizované Ypsilonové zkoušky a z velmi tenkých stěn, ve kterých je struktura litiny díky velké ochlazovací rychlosti značně odlišná.



Obr.18. Rozměry zkušebních destiček pro tahovou zkoušku

Z přetržených destiček tahové zkoušky byly ve vzdálenosti 80 mm od vtoku odebrány vzorky pro zhotovení metalografických výbrusů a vyhodnocení mikrostruktury. Tak byly získány snímky mikrostruktur z destiček všech tloušťek dané tavby. Podobně byl zhotoven metalografický výbrus a hodnocena struktura u přetržené tyčky zhotovené pro tahovou zkoušku z normalizované Ypsilonové zkoušky.



Rozměr	Typ		
	I	II	III
u	12,5	25	50
v	40	55	100
x	25	40	50
y^a	135	140	150
z^b	b		

a...pouze informativní

b...funkcí délky testovacího vzorku

Obr.19. Schéma a rozměry Ypsilonové zkoušky podle ISO/DIS 16112

Z každé provedené tavby byly dále odlévány vzorky pro zjištění chemického složení tzv. "medaile" a tyč o průměru $d=30\text{mm}$ pro rychlé informativní zjištění struktury.

V tab.9 je stručný přehled experimentálních odlitků odlévaných z každé tavby, dále jsou uvedeny zkušební vzorky získané z těchto odlitků a následně zkoušky prováděné na jednotlivých vzorcích.

Tab.9. Přehled experimentálních odlitků, získaných vzorků a prováděných zkoušek

Ypsilonová zkouška	
- tyčka s konstantním kruhovým průřezem	tahová zkouška + nový způsob hodnocení
	hodnocení metalografické struktury
Odlitek destiček různé tloušťky (případně i s nálitkem pro dosažení průtočnosti)	
- ploché destičky s „licí kůrou“	měření tvrdosti
	tahová zkouška + nový způsob hodnocení
	hodnocení metalografické struktury
„Medaile“	určení chemického složení kvantometrem
Tyč průměru 30mm	rychlé informativní hodnocení metalografické struktury

5.4. ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

5.4.1. Měření tvrdosti

Měření tvrdosti byla prováděna na všech destičkách z každé provedené tavby. Byla zvolena metoda podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1) s kuličkou $d=5\text{mm}$ a silou 30kN . Vždy byly naměřeny tři hodnoty tvrdosti ve vzdálenosti 10 mm od volného konce destičky a tři hodnoty ve vzdálenosti 10 mm od vtoku do destičky. Z těchto hodnot byly prostým aritmetickým průměrem stanoveny hodnoty tvrdosti zvlášť pro volný konec destičky a konec u vtoku. Kvůli značné rozdílnosti jsou v tabulkách vždy uváděny obě hodnoty.

5.4.2. Hodnocení vlastností LČG podle tahových deformačních charakteristik

Tahová zkouška je předepsána normou ČSN EN 10002-1 (ČSN 420310-78). Jedná se o velmi rozšířenou mechanickou zkoušku, protože není příliš časově náročná a podává základní informace o materiálu. Jedná se o pevnost v tahu R_m [MPa], dále u ocelí mez kluzu R_p [MPa] (ev. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ u litin), tažnost A [%] a kontrakci. Zkouška se obvykle provádí za normální teploty ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) na válcových tyčích, zpravidla bez vrubů. Principem je natahování tyčí na tzv. trhacích strojích, předepsanou rychlostí deformace ($(2,5\text{ až }25)\cdot 10^{-4}\text{ [s}^{-1}\text{])}$ až do přetržení, přičemž je zaznamenávána síla F [N] a změna délky vzorku Δl [mm]. Z ní jsou pak následovně vyhodnoceny výše uvedené hodnoty.

Dosavadní stav znalostí chování grafitických litin při jejich zatěžování značně zaostává za obdobnými znalostmi a zkušenostmi v oboru ocelí. Rozdílnost mechanismu deformace litin je závislá nejen na velikosti a rozložení grafitu, ale zejména na tvaru grafitu a jeho prostorovém uspořádání. Složitou problematiku grafitických litin jako strukturně nehomogenního konstrukčního materiálu dále komplikuje značná citlivost krystalizace litin a tím i jejich vlastností na různé tloušťky stěn, technologické parametry výroby odlitku jako jsou podmínky při tavení, úprava taveniny i odlévání. Z toho důvodu je u dosavadních normovaných zkoušek nepříznivé, že se zkoušejí pouze obrobené tyče kruhového průřezu získané z odděleně litych nebo přilitych standardních tyčí, zatímco odlitky se zpravidla používají jen minimálně opracované s větším či menším vlivem tzv. lící kůry na napětové poměry povrchových vrstev.

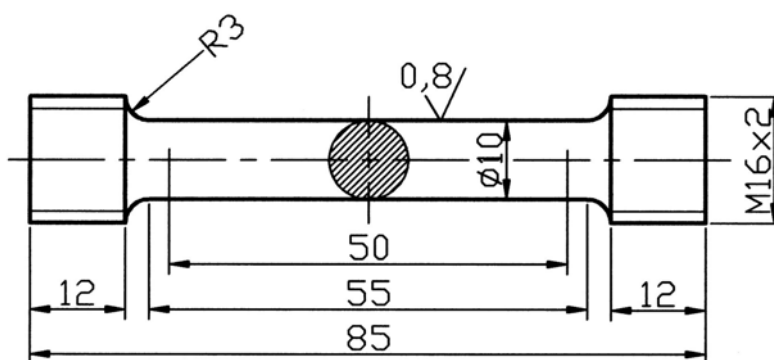
Znalost reálných vlastností grafitických litin postrádáme především v tenkých stěnách pod 10mm, u kterých se výše zmíněné vlivy projevují zvláště významně a které bývají velmi častým konstrukčním prvkem dynamicky namáhaných složitých odlitků jako jsou bloky a hlavy válců spalovacích motorů nebo komponenty brzdových systémů.

Celkově u grafitických litin postrádáme zejména přesné stanovení modulu pružnosti E , nebo hodnoty napětí analogické mezi kluzu (smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ je čistě informativní a kromě LKG nemá u grafitických litin takřka žádné opodstatnění [30,31]) Bez znalosti těchto hodnot nelze prakticky určit dovolené namáhání litin pro pevnostní výpočty, ani v konstrukci přesně a úsporně dimenzovat dynamicky namáhané odlitky.

Vyvstala tedy potřeba odlišného způsobu zkoušení a rozboru deformačních charakteristik získaných vzorků. Jako vhodná se jevila metodika a způsob matematické interpretace vypracované na základě širšího výzkumu mechanických vlastností grafitických litin v závodě LIAZ 04 – Slévárna Liberec koncem 70. let Prof. Exnerem [30] a dále zdokonalované na TU v Liberci [31,32].

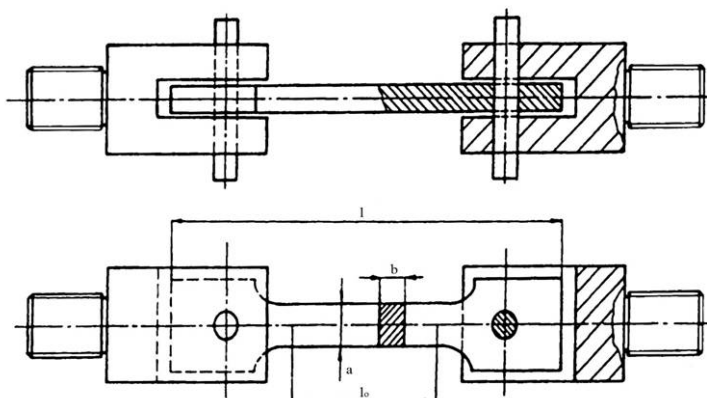
5.4.2.1. Nová metodika hodnocení tahových charakteristik

Základem byl přechod na zkoušení tyčí tvarově obdobných pro zkoušky LKG a ocelí, tzn. tyče s definovanou prizmatickou částí pro sledování prodloužení. Tyto vzorky byly získány z Ypsilonové zkoušky. Rozměry a tvar zkušebních tyčí jsou v souladu s ČSN 42 0316 a jsou uvedeny na *obr. 20*.



Obr.20. Tvar a rozměry tyčky s prizmatickou částí pro tahovou zkoušku

Dále byly pro lepší zachycení reálných vlastností odlitků zkoušeny výše popsané ploché tyče s licí kůrou, zatěžované v jedné ose přes čepy v upínacích hlavách viz *obr. 21*.



Obr. 21. Plochá tyč upnutá pomocí čepů

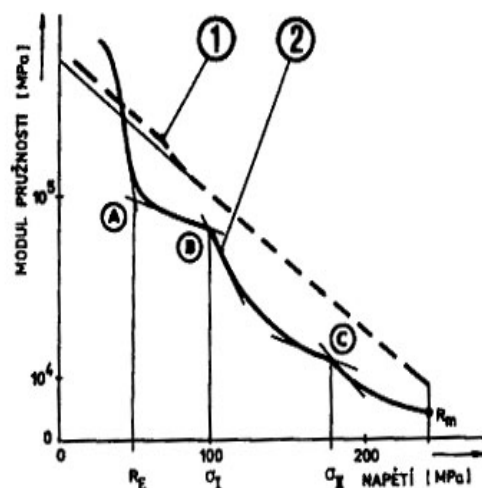
Podstatou této nové metody hodnocení tahových charakteristik je velmi přesné snímání prodloužení zkušební tyče při tahové zkoušce až do přetržení a následné vyhodnocení získané charakteristiky jednak po její transformaci do logaritmických souřadnic $\log \sigma_i - \log \varepsilon_i$ jednak po její derivaci $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, tj. vyhodnocení bezprostřední velikosti modulu pružnosti E_i a vynesemím závislosti E_i na odpovídajícím napětí σ_i .

Pro sledování velmi malých délkových změn v závislosti na napětí bylo použito laserového extenzometru. Toto zařízení sleduje povrch zkušební tyče a snímá prodloužení tyče mezi předem nanesenými značkami. To umožňuje velmi přesné a komplexní měření prodloužení zkoušené tyče mezi krajními značkami základní měřené délky.

Nejvýznamnějším poznatkem při vyhodnocování deformačních charakteristik touto metodou je (dle poznatků Exnera) průběh derivované křivky $\sigma - \varepsilon$ a závislost této derivace na napětí (*obr.22*). Kromě meze pevnosti lze z takto získané závislosti nově odečíst další hodnoty mezních napětí [30] :

- a) mez pružných deformací R_E – zlom A
- b) mez mikroplastických deformací σ_I – zlom B
- c) mez nestabilního šíření makroplastických deformací σ_{II} – zlom C

Na počátku zatěžování se deformuje převážně základní kovová hmota. Po překročení meze pružných deformací R_E dochází v mikroobjemech kovové matrice na rozhraní s grafitem k iniciaci prvních mikrotrhlin. Zvyšováním zatížení roste počet mikrotrhlin až do hodnoty σ_I , která je svou fyzikální podstatou analogická mezi kluzu u ocelí. Dále se rozšiřuje podíl plasticky deformovaných oblastí dalším rozvojem poruch až do meze nestabilního šíření makroplastických deformací. Po překročení σ_{II} dochází k rychlému rozvoji poruch až do porušení materiálu. Prakticky dochází ke zhroucení celého skeletu kovové matrice litiny narušené grafitovými útvary i poruchami. Hodnoty modulu pružnosti v této oblasti klesají o jeden až dva řády.



Obr. 22. Průběh křivky první derivace „panenské“ deformační charakteristiky

- 1 – sekantní modul pružnosti E_s
 2 – derivovaná křivka E_l

Ukázalo se, že pro hodnocení mezních stavů grafitických litin vedle meze pevnosti R_m popř. $R_{P0,2}$ jsou R_E , σ_I , σ_{II} velmi výstižnými kritérii zjištěnými netradičním vyhodnocením tahové charakteristiky. Rovněž by pro hodnocení modulu pružnosti měly být využívány hodnoty sekantních modulů pružnosti, neboť lépe charakterizují určenou hodnotu.

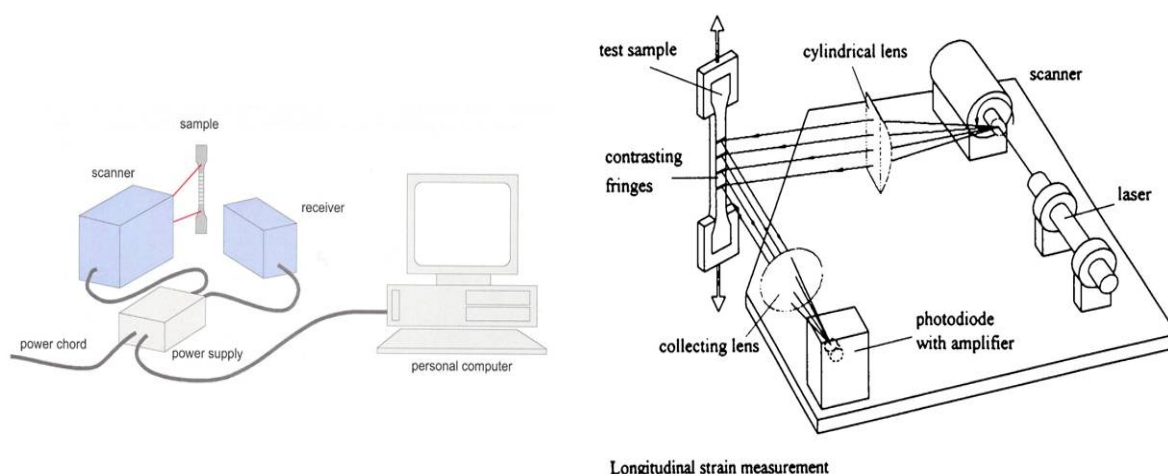
5.4.2.2. Zařízení použita pro měření a vyhodnocení tahových charakteristik

Pro měření tahových charakteristik bylo použito univerzálního tahacího stroje TIRA Test 2300 doplněného o laserový extenzometr firmy Fiedler Optoelektronik GmbH.

Jedná se o laserový extenzometr typ P-2A-50 firmy Fiedler Optoelektronik GmbH, který má měřicí rozsah 50 mm, rozlišení 0,1 μm a přesnost třídy 0,2 (DIN/EN 10002-4). Přístroj je vhodný speciálně pro materiály s nízkou tažností, jako např. litiny, skleněná vlákna, vysokopevnostní oceli.

Extenzometr využívá laserový paprsků ke snímání povrchu zkušebního vzorku a sleduje jeho chování po celou dobu až do přetržení. Měřicí zařízení se skládá ze scanneru a optopřijímače (*obr.23*). Scanner snímá povrch zkušebního vzorku laserovými paprsky. Vytvářejí viditelnou limitovanou oblast snímání. V této oblasti dochází k zachycení kontrastujících značek na optopřijímači, jedná se o dvoubodové měření. Časová vzdálenost mezi impulsy koresponduje se vzdáleností jednotlivých značek na povrchu vzorku v nenapětovém a napětovém stavu měření. Než přistoupíme k měření musíme mít zajištěnou přesnou polohu extenzometru. Velký důraz je kladen na vzdálenost scanneru od zkušebního vzorku. Musí odpovídat vzdálenosti stanovené výrobcem. V opačném případě dochází ke zkreslení signálu. Pokud intenzita signálu neodpovídá požadovaným parametrům, jsou následně ovlivněna výsledná data získaná měřením. Kontrola signálu se provádí osciloskopem, který vyhodnocuje kvalitu a znázorňuje kontrastní oblasti. Počet kontrastujících oblastí závisí na počtu značek umístěných na povrchu zkušebního vzorku. Na základě doporučení výrobce zařízení zcela postačují pro vyhodnocení signálu a vlastní měření dvě kontrastující značky. Osciloskop zpracovává signál a převádí ho do grafické podoby. Z ní jsme schopni určit zda má signál správnou intenzitu a nedochází k jeho rušení.

Při vlastním měření je analogový výstup extenzometru převáděn do digitální podoby. Software LQM, který je součástí extenzometru zaznamenává tento datový vstup synchronizovaně s axiálním napětím. Průběžně je sledován průběh zatěžovací křivky a ve formě dat ukládán do binárního souboru, který je poté analyzován softwarem LQA.



Obr. 23. Princip měření laserového extenzometru

Předpokladem úspěšného vyhodnocení deformačních charakteristik je analýza dat, získaných z předchozího měření. Software matematicky vyhodnocuje data již při načítání. Po ukončení operací, probíhajících řádově od několika sekund do několika minut, se zobrazí na obrazovce hlavní menu. Volbou příkazu dochází ke grafickému zobrazení volených závislostí naměřených dat. Úvodní zobrazení podává přímo naměřenou křivku „napětí – prodloužení“, kterou je možné pomocí dalších funkcí programu vhodným způsobem poněkud vyhladit. Tím dostáváme reprezentativní křivku tahové zkoušky. Výsledné grafy jsou zobrazeny na monitoru, jednak jako deformační charakteristika „napětí - prodloužení“ nebo jako „modul pružnosti – prodloužení“. S těmito grafy však nelze, kromě tisku, dále nijak pracovat ani jejich zobrazení jakkoliv upravovat. Je to způsobeno tím, že software LQ, který je součástí extenzometru pracuje v DOSovském prostředí. Proto je nutné z vyobrazených diagramů vyexportovat data ve formě hodnot do jiného programu k dalšímu zpracování. K tomuto účelu využíváme programu Excel od Microsoftu.

Pro hodnocení mezních stavů materiálu ovšem musíme získat závislost „modul pružnosti – napětí“ a tahovou charakteristiku v logaritmických souřadnicích ($\log \sigma - \log \epsilon$). Převodem do logaritmických souřadnic získáme snadněji jednotlivé meze, které se projeví jako zlomy na vynesných křivkách. Programem na počítači, který je součástí extenzometru nejsme schopni provést tyto operace.

5.5. HODNOCENÍ MIKROSTRUKTURY

U vybraných taveb byly pro hodnocení struktury zhotoveny metalografické výbrusy z destiček všech tloušťek a byly doplněny vzorkem z Ypsilonové zkoušky kvůli možnosti objektivního srovnání s mikrostrukturou z normované zkoušky. Bylo tak možné sledovat strukturální změny v materiálu s klesající tloušťkou stěny odlitku. Mikrostruktura všech vzorků byla hodnocena podle normy ČSN 42 0461 – Hodnocení metalografické struktury litin. Kvůli velmi jemnozrnné struktuře a jemným útvarům grafitu byla nenaleptaná struktura nezřetelná a pro zvýraznění a umožnění hodnocení grafitu vůbec bylo třeba vzorky nejprve naleptat 2% roztokem Nitalu.

Snímky mikrostruktury byly pořízeny v laboratořích KSP na TU v Liberci na optickém mikroskopu Neophot 21 s použitím digitální kamery Nikon a softwaru pro obrazovou analýzu NIS Elements (dříve LUCIA).

6. POPIS PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ

6.1. SÉRIE TAVEB PRO NAVRŽENÍ VHODNÉ TECHNOLOGIE A ZJIŠTĚNÍ OPTIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ MODIFIKÁTORU

V době zahájení experimentů se žádná slévárna v ČR nezabývala výrobou LČG, vývoj a příprava taveb tedy byly prováděny na základě poznatků z dostupné literatury, kde byla pouze neúplná doporučení a výsledky experimentů z 80.let minulého století, které výrobu LČG za pomoci čistých KVZ nedoporučovaly nebo dokonce vylučovaly. Proto bylo třeba nejprve odzkoušet vhodný výrobní postup a množství modifikátoru pro námi používaný základní kov a podmínky zpracování. Tento úkol byl značně znesnadněn skutečností, že ani naše univerzita ani okolní slévárny nedisponují možností analýzy prvků KVZ ve výsledném kovu. Bylo tedy posuzováno nikoliv zbytkové množství prvků modifikátoru v tavenině, ale přidávané množství modifikátoru, které ve všech případech nemusí nutně korelovat s jeho zbytkovým množstvím. Na odděleně litých tyčích průměru 30mm byl sledován vliv množství modifikátoru na tvar grafitu. Následně byla upravována vsázka a množství očkovadla tak aby byla dosažena i vhodná struktura matrice.

Tab.10 uvádí složení vsázek a množství použitého modifikátoru a očkovadel. V *tab.11* jsou výsledná chemická složení taveb, a vyhodnocení mikrostruktury získané litiny.

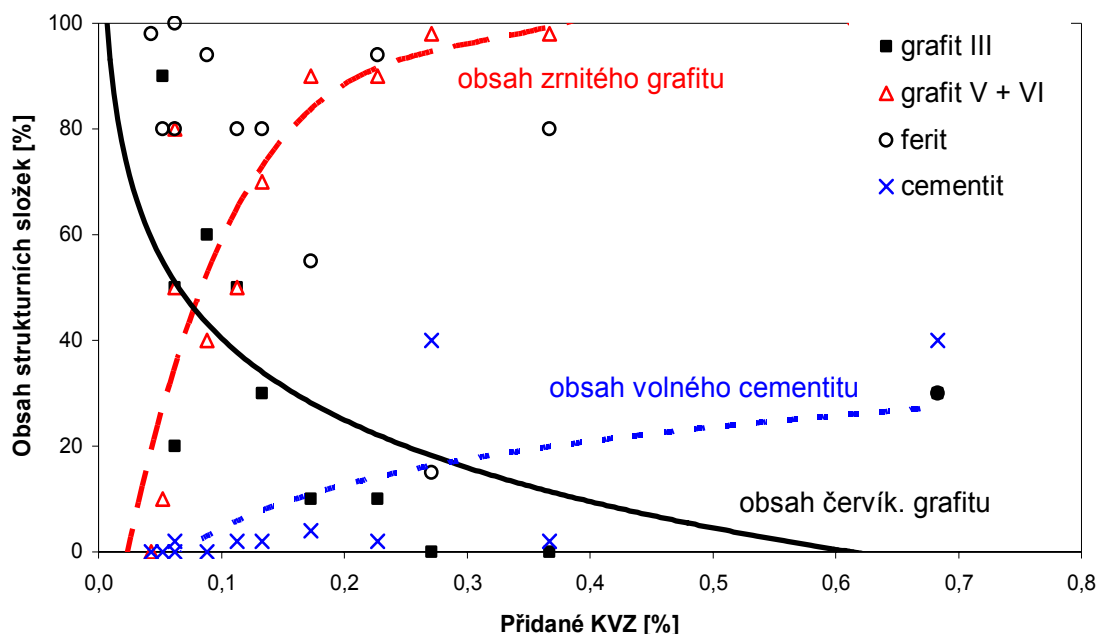
Chemická složení byla orientačně zjišťována ve slévárně Ferex Ostašov a jak bylo později ověřeno jsou značně nepřesná. Graf na *obr.24* potom shrnuje dosažený typ grafitu a množství volného cementitu v matrici v závislosti na přidávaném množství KVZ u jednotlivých taveb z tohoto souboru.

Tab.10. Složení vsázek a množství použitého modifikátoru a očkovačel

číslo tavby	Sorel [kg]	KVZ [kg]	KVZ [%]	FeSi75 [kg]	FeSi75 [kg]	Superseed [kg]
PX1	30	0,0814	0,271	0,90	0,17	0,13
PX2	30	0,0520	0,173	1,00	0,15	0,17
PX3	30	0,0185	0,062	1,15	0,15	0,17
PX4	30	0,0130	0,043	0,95	0,15	0,17
PX5	30	0,0340	0,113	0,95	0,15	0,17
PX6	30	0,0265	0,088	0,95	0,15	0,17
PX7	30	0,0155	0,052	0,95	0,15	0,17
PX8	30	0,0400	0,133	0,95	0,15	0,17
PX9	30	0,0680	0,227	0,95	0,15	0,17
PX10	30	0,0825	0,275	0,95	0,15	0,17
PX11	30	0,1100	0,367	0,95	0,15	0,17
PX12	30	0,2050	0,683	0,95	0,15	0,17

Tab.11. Výsledné chemické složení a metalografická struktura litiny z odděleně litych tyčí průměru 30mm

číslo tavby	C [%]	Si [%]	přidané KVZ [%]	mikrostruktura		
PX1	3,77	2,20	0,271	V 4	Fe 15	C 40
PX2	3,66	2,24	0,173	10% III 5 + 90% V, VI 5	Fe 55	C 4
PX3	3,62	3,02	0,062	50% III 6 + 50% VI 5	Fe	
PX4	3,72	2,53	0,043	I D 7	Fe	
PX5	3,63	2,43	0,113	50% III 6 + 50% VI 5	Fe 80	C 2
PX6	3,81	2,68	0,088	60% III 6 + 40% V, VI 5	Fe 94	
PX7	3,73	2,61	0,052	90% III 6 + 10% V, VI 5	Fe 80	
PX8	3,76	2,63	0,133	30% III 5 + 70% V, VI 5	Fe 80	C 2
PX9	3,80	2,78	0,227	20% III 6 + 80% V, VI 5	Fe 80	C 2
PX10	3,69	2,68	0,275	10% III 6 + 90% V, VI 6	Fe 94	C 2
PX11	3,82	2,59	0,367	V, VI 5	Fe 80	C 2
PX12	3,77	2,73	0,683	30% III 5 + 70% V, VI 4	Fe 30	C 40



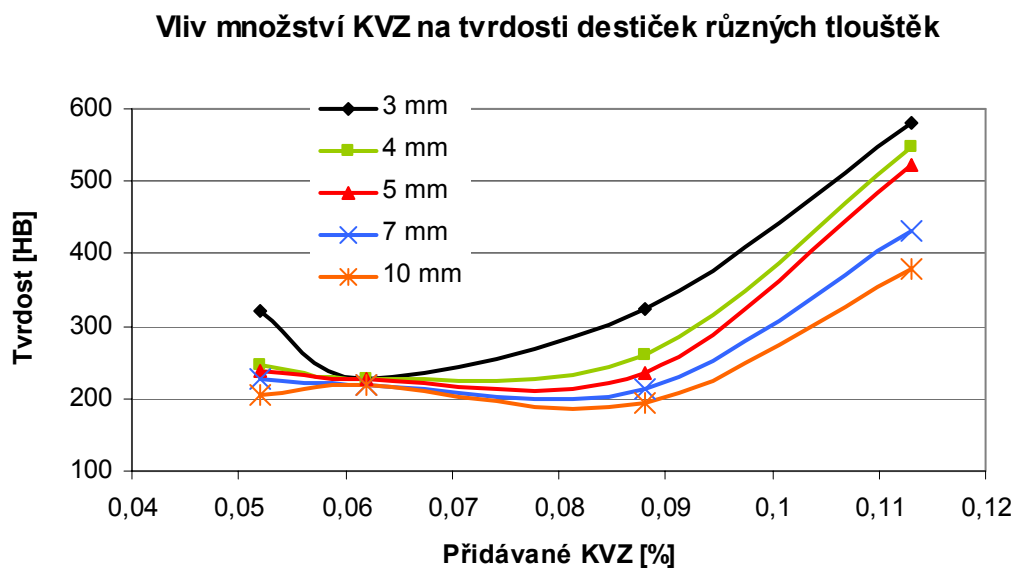
Obr. 24. Vliv přidávaného množství KVZ na mikrostrukturu litiny

Z provedených taveb je patrné že pro získání červíkovitého tvaru vyloučeného grafitu a zamezení výskytu volného cementitu ve struktuře litiny je třeba přidávat množství modifikátoru (čistých KVZ) v intervalu 0,05 až 0,08 hmotnostních %.

Na destičkách taveb u kterých bylo dosaženo alespoň 50% červíkovitého grafitu, byla následně měřena tvrdost jako ukazatel mikrostruktury ve velmi tenkých stěnách odlitku. V tab.12 jsou uvedeny hodnoty tvrdostí vždy pro volný konec destičky a pro konec s připojeným vtokem. Na obr.25 je potom graf závislosti tvrdostí jednotlivých destiček na množství přidávaného modifikátoru.

Tab.12. Tvrdosti jednotlivých destiček z vybraných taveb

Číslo tavby	Tvrdosti [HB] jednotlivých destiček				
	3mm	4mm	5mm	8mm	10mm
PX3	226	227	228	220	218
u vtoku	213	219	214	218	214
PX5	582	547	522	432	378
u vtoku	555	530	451	275	266
PX6	324	260	235	212	194
u vtoku	194	193	190	187	187
PX7	320	246	237	228	206
u vtoku	210	193	192	190	187



Obr.25. Vliv přidávaného množství KVZ na tvrdosti destiček různé tloušťky

6.2. TAVBY PRO SLEDOVÁNÍ VLIVU Mn A Cu

Všechny dosavadní tavby byly provedeny pouze ze surového železa s nízkým obsahem Mn a Cu, tzn. prvků, které se běžně hojně používají k legování litin a zvýšení hodnot jejich mechanických vlastností. U taveb PX13 až PX17 byl zjišťován vliv těchto prvků na strukturu litiny v tenkých stěnách. Obsah Mn byl u základního kovu zvyšován přidáním FeMn65 a obsah Cu přidáním měděných třísek do vsázky. V *tab.13* je uvedeno složení vsázek těchto taveb a v *tab.14* potom výsledné chemické složení a metalografická struktura výsledné litiny ze odděleně lité tyče průměru 30m.

Tab.13. Složení vsázek taveb se zvýšeným obsahem Mn a Cu

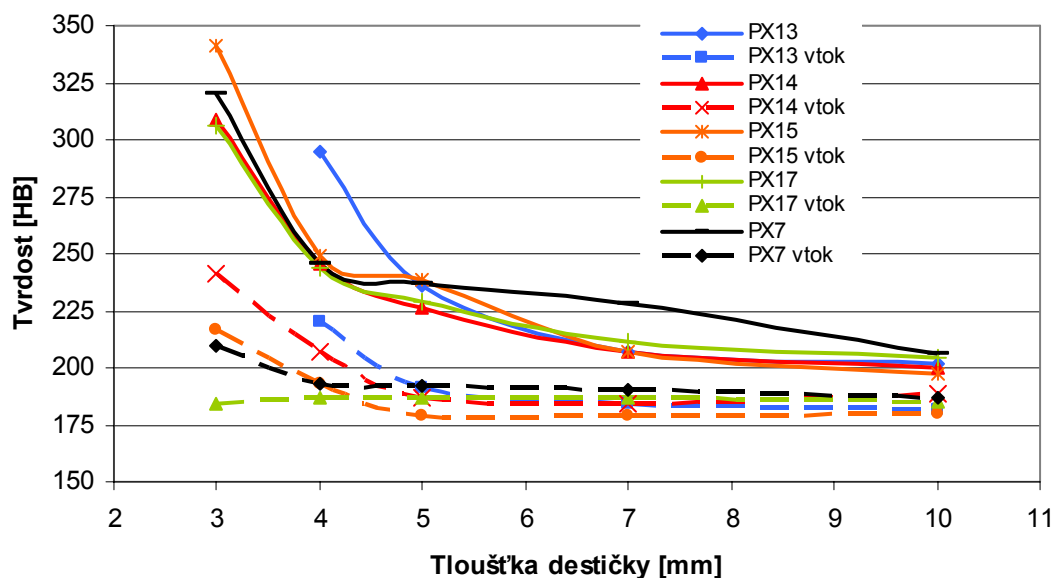
číslo tavby	Sorel [kg]	KVZ [kg]	KVZ [%]	FeSi75 [kg]	FeSi75 [kg]	Superseed [kg]	FeMn65 [kg]	Cu [kg]
PX13	25	0,0150	0,060	0,80	0,13	0,2	0,18	
PX14	25	0,0142	0,057	0,80	0,13	0,2	0,2	
PX15	25	0,0140	0,056	0,80	0,12	0,18	0,12	
PX17	25	0,0130	0,052	0,70	0,13	0,2		0,15

Tab.14 Výsledné chemické složení a metalografická struktura litiny z odděleně litých tyčí průměru 30mm

číslo tavby	C [%]	Si [%]	přidané KVZ [%]	Mn [%]	Cu [%]	mikrostruktura		
PX13	3,74	2,61	0,060	0,39	0,01	70% III 6 + 30% VI 6	Fe 80	C 4
PX14	3,69	3,05	0,057	0,44	0,01	98% III 5/6 + 2% V 5/6	Fe 80	C 2
PX15	3,81	2,64	0,056	0,26	0,01	80% III 5/6 + 20% VI	Fe 80	C 2
PX17	3,78	2,39	0,052	0,03	0,42	95% III 5/6 + 5% V, VI	Fe 94	C 2

Tab.15. Tvrdost jednotlivých destiček ze sledovaných taveb

Číslo tavby	Tvrdosti [HB] jednotlivých destiček				
	3mm	4mm	5mm	8mm	10mm
PX13	-	295	236	207	202
u vtoku	-	220	191	184	182
PX14	309	246	226	207	200
u vtoku	241	207	187	184	189
PX15	341	249	239	207	197
u vtoku	217	193	179	179	180
PX17	306	244	229	211	204
u vtoku	184	187	187	187	185



Obr.26. Tvrdosti jednotlivých destiček z taveb legovaných Mn a Cu v závislosti na tloušťce stěny. Pro srovnání přidána tavba PX7 s nízkým obsah těchto prvků

6.3. TAVBY MODIFIKOVANÉ KOMPLEXNÍM MODIFIKÁTOREM MG-KVZ PRO POROVNÁNÍ S ČISTÝMI KVZ

V rámci experimentu byly provedeny i dvě tavby modifikované komplexním modifikátorem na bázi Mg-KVZ. Nebyl však použit žádný komerčně vyráběný komplexní modifikátor, ale jednoduše směs KVZ a FeSiMg s obsahem 5-6% Mg. Tím byl vyloučen vliv ostatních prvků v komplexních modifikátorech běžně obsažených, jako jsou např. Ca, Al. Účelem těchto taveb bylo srovnání dosažené mikrostruktury a mechanických vlastností litin vyráběných různými postupy. Bylo tedy možné porovnávat LČG vyrobenou komerčně nejpopulárnějším způsobem (použitím komplexního modifikátoru Mg-KVZ) a LČG vyrobenou pouze čistými neseparovanými KVZ.

Tab.16. Složení vsázek taveb modifikovaných společně KVZ a FeSiMg

číslo tavby	Sorel [kg]	KVZ [kg]	KVZ [%]	FeSi75 [kg]	FeSi75 [kg]	Superse ed [kg]	FeSiMg [kg]	Cu [kg]
PX18	25	0,0065	0,026	0,60	0,23	0,2	0,08	
PX19	25	0,0060	0,024	0,60	0,23	0,2	0,076	0,12

Tab.17. Výsledné chemické složení a metalografická struktura litiny z odděleně litych tyčí průměru 30mm

číslo tavby	C [%]	Si [%]	Cu [%]	přidané KVZ [%]	Mg [%]	mikrostruktura		
PX18	3,670	3,170	0,020	0,026	0,009	90% III 5 + 10% VI 6	Fe 94	
PX19	3,720	2,490	0,402	0,024	0,006	98% III 5 + 2% VI 6	Fe 94	

Tab.18. Tvrdost jednotlivých destiček ze sledovaných taveb

Číslo tavby	Tvrdosti [HB] jednotlivých destiček				
	3mm	4mm	5mm	8mm	10mm
PX18	207	207	204	193	179
u vtoku	180	177	179	177	174
PX19	170	211	209	187	179
u vtoku	184	177	182	179	177

6.4. TAVBY S DEFINOVANÝM PRŮTOČNÝM MNOŽSTVÍM

Úkolem další částí experimentu bylo nějakým způsobem kvantifikovat vliv ochlazovací rychlosti na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu LČG vyráběné pomocí KVZ. Protože celá práce je zaměřená především technologicky, byla snaha spíše změnit některý z technologických parametrů při zachování velmi nízkých tloušťek destiček, než měření tepelně fyzikálních veličin odlitku a formy. Tomuto kritériu nejlépe vyhovovala změna průtočnosti zkušebního odlitku. V tavných PX21 až PX 25 byl tedy za každou destičku připojen náletek s objemem odpovídajícím 80% objemu odlitku a takto upravený odlitek byl odléván zároveň s původním zkušebním odlitkem. Výsledkem byly dvě sady destiček z každé tavby, jedna sada z původního odlitku a jedna s průtočností 80%. U obou sad tím bylo zaručeno shodné chemické složení i sekundární zpracování taveniny. Zanesení vlivu průtočnosti do experimentu navíc lépe odpovídá skutečným podmínkám v reálném odlitku.

V následujících tabulkách jsou opět uvedeny skladby vsázek jednotlivých taveb (*tab.19*), výsledná chemická složení a dosažená metalografická struktura (*tab.20*). U Tavby PX21 bylo nejspíše použito nedostatečné množství modifikátoru, takže výsledkem byla mikrostruktura s velmi jemným dendriticky neusměrněným lupínkovým grafitem a kompletně feritická matrice. Tomu odpovídá i velmi nízká tvrdost destiček.

Tab.19. Složení vsázek taveb definovanou průtočností

číslo tavby	Sorel [kg]	KVZ [kg]	KVZ [%]	FeSi75 [kg]	FeSi75 [kg]	Superseed [kg]	FeMn65 [kg]	Cu [kg]
PX21	25	0,0110	0,044	0,70	0,2	0,2		
PX23	25	0,0160	0,064	0,70	0,2	0,2	0,2000	
PX24	25	0,0180	0,072	0,70	0,2	0,2		
PX25	25	0,0170	0,068	0,70	0,2	0,2		0,15

Tab.20. Výsledné chemické složení a metalografická struktura litiny z odděleně litých tyčí průměru 30mm

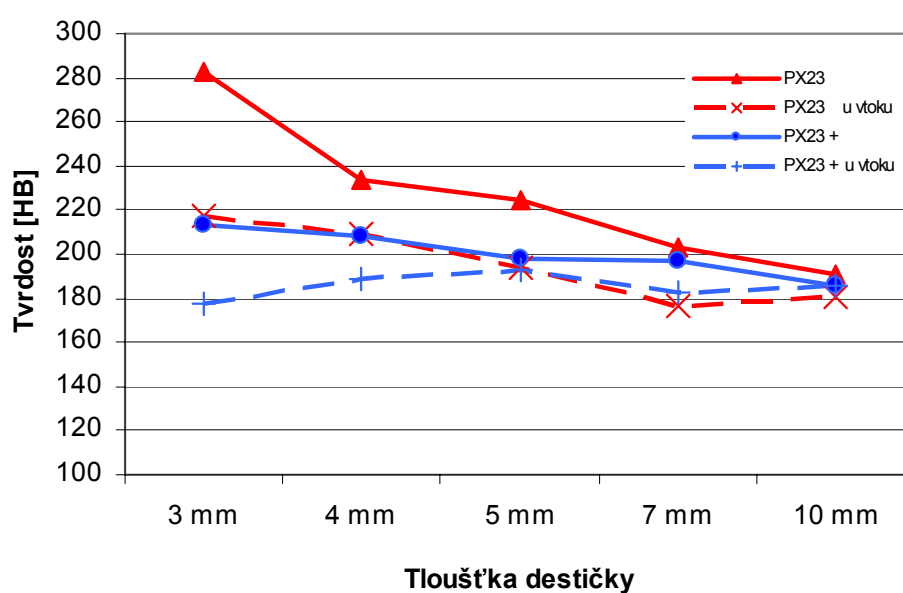
číslo tavby	C [%]	Si [%]	přidané KVZ [%]	Mn [%]	Cu [%]	mikrostruktura		
PX21	3,660	3,060	0,044	0,030	0,013	100% I 7/8 D	Fe 100	
PX23	3,680	3,070	0,060	0,250	0,012	98% III 6 + 2% VI 6	Fe 94	
PX24	3,710	3,000	0,064	0,020	0,012	70% III 5/6 + 30% VI 6	Fe 100	
PX25	3,650	3,080	0,072	0,020	0,539	80% III 5/6 + 20%VI 6	Fe 94	C 2

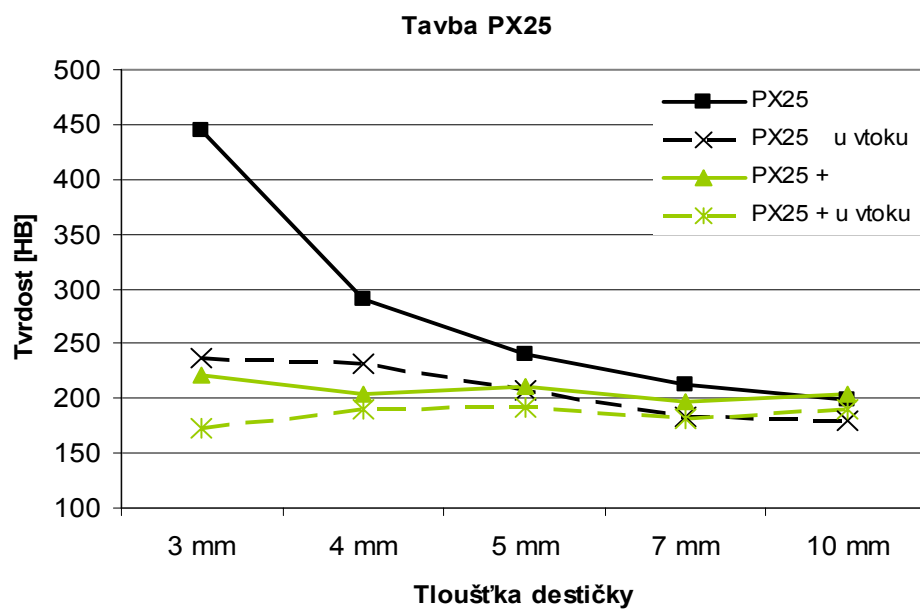
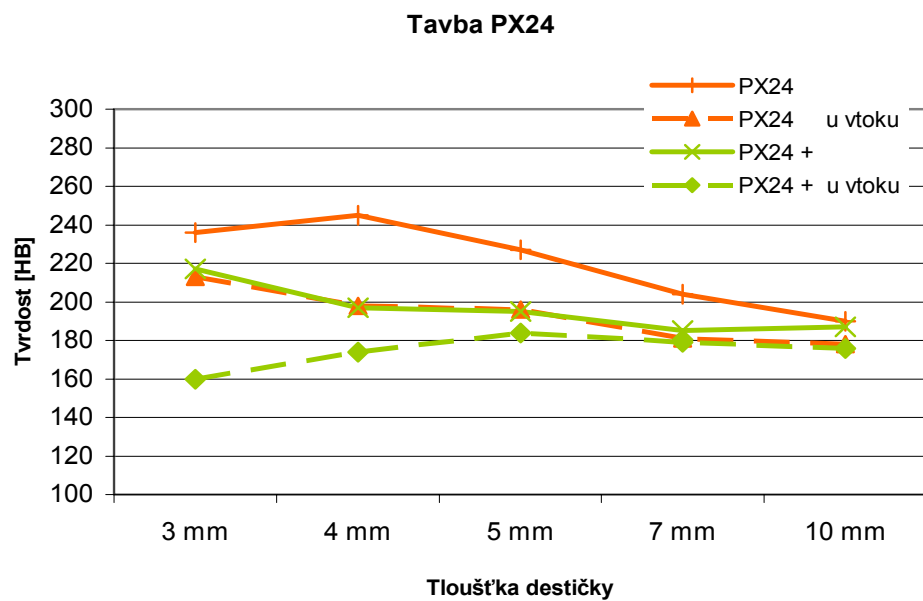
Pro porovnání tvrdostí sad destiček vždy z jedné tavby s průtočností a bez ní je uvedena tab.21 a obr.27.

Tab.21. Tvrdosti jednotlivých destiček ze sledovaných taveb

	Tvrdosti [HB] jednotlivých destiček				
Číslo tavby	3mm	4mm	5mm	8mm	10mm
PX21	168	160	162	160	158
u vtoku	156	162	160	158	156
PX23	283	234	225	203	191
u vtoku	217	209	194	177	181
PX23 +	213	208	198	197	186
u vtoku	178	189	193	183	186
PX24	236	245	227	204	190
u vtoku	213	198	196	181	178
PX24 +	217	197	195	185	187
u vtoku	160	174	184	179	176
PX25	445	290	240	213	198
u vtoku	237	232	208	183	180
PX25 +	221	204	210	197	204
u vtoku	173	190	191	181	190

Tavba PX23





Obr.27. Grafy průběhů tvrdostí u destiček s průtočností 80% a bez ní

6.5. KOMPLETNÍ HODNOCENÍ VYBRANÝCH TAVEB

Ze všech provedených taveb byl následně vybrán reprezentativní soubor taveb u kterých bylo dosaženo požadované mikrostruktury a nebo naopak došlo již k nežádoucímu výskytu lupínkového, popřípadě většího množství kuličkového grafitu. U těchto taveb bylo přesněji zjištěno jejich chemické složení i s obsahem zbytkových KVZ a Mg. Na vzorcích z Ypsilonové zkoušky a ze získaných destiček byly za pomoci laserového extenzometru měřeny hodnoty mechanických vlastností a vyhodnocována metalografická struktura tak jak popisují předchozí kapitoly 4.4 a 4.5.

V *tab.22* je přehled vybraných taveb, jejich ověřené výsledné chemické složení i s obsahy Ce a La a hodnocení metalografické struktury. Tabulka umožňuje porovnat vliv zbytkových KVZ na výsledný tvar grafitu v odlitku. Na *obr.28* potom snímky dosažených metalografických struktur z Ypsilonových zkoušek jednotlivých taveb. *Tab.23* shrnuje hodnoty mechanických vlastností vzorků z Ypsilonové zkoušky a uvádí pro porovnání jejich metalografickou strukturu. Z Ypsilonové zkoušky z každé tavby byly vyrobeny dva vzorky pro tahovou zkoušku s rozměry podle *obr.20*.

V příloze 1 jsou kompletní záznamy z tahových zkoušek těchto vzorků. Pokud to tyto záznamy umožňovaly, byly z nich vyhodnoceny hodnoty mezních napětí tak jak navrhoval Exner[30]. Protože používané měřicí zařízení ani software neumožňuje zobrazení závislosti E na σ jsou v příloze uvedeny ke každému vzorku dva grafy:

- a) závislost $E(\varepsilon)$ ze které lze odečíst hledané mezní stavy a jim odpovídající ε
- b) klasický záznam tahové zkoušky $\sigma(\varepsilon)$ ve kterém lze k těmto mezním ε přiřadit odpovídající mezní napětí σ_I, σ_{II} .

Zjištěné hodnoty meze mikroplastických deformací σ_I , které jsou analogické mezi kluzu u ocelí, a hodnoty meze nestabilního šíření makroplastických deformací σ_{II} po jejímž překročení dochází k spontánnímu rozvoji poruch až do lomu jsou spolu s ostatními hodnotami mechanických vlastností uvedeny v *tab.23*. Pro srovnání jsou v tabulce uvedeny i hodnoty běžně vyhodnocované smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$.

Tab.22. Přehled vybraných taveb, jejich ověřené chemické složení a hodnocení metalografické struktury

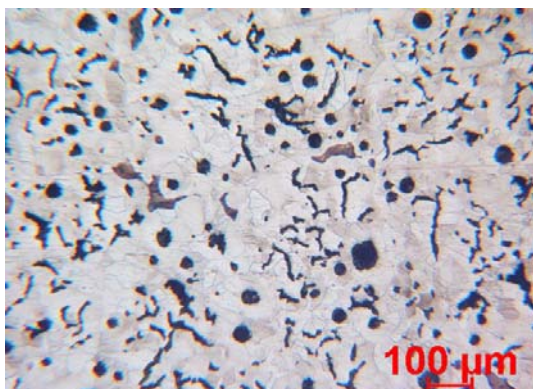
číslo tavby	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]	Přidané KVZ [%]	Ce [%]	La [%]	metalografická struktura	
PX15	3,670	3,060	0,380	0,012	0,031	0,005	-	0,056	0,020	0,014	70% III 5/6 + 30% VI 6	Fe 94
PX17	3,700	2,800	0,030	0,506	0,031	0,007	-	0,052	0,016	0,010	95% III 5/6 + 5% VI 6	Fe 94
PX18	3,670	3,170	0,030	0,020	0,031	0,009	0,009	0,026	0,007	0,004	98% III 5/6 + 2% VI 6	Fe 94
PX19	3,720	2,490	0,020	0,402	0,033	0,006	0,006	0,024	0,005	0,003	95% III 5/6 + 5% VI 6	Fe 94
PX20	3,660	3,040	0,020	0,014	0,031	0,007	-	0,060	0,015	0,010	90% III 5/6 + 10% V, VI 6	Fe 94
PX21	3,660	3,060	0,030	0,013	0,028	0,001	-	0,044	0,014	0,009	I 100% 7,8 D	Fe
PX23	3,680	3,070	0,250	0,012	0,029	0,008	-	0,064	0,016	0,010	98% III 6 + 2% VI 6	Fe 94
PX24	3,710	3,000	0,020	0,012	0,030	0,005	-	0,072	0,022	0,016	70% III 5/6 + 30% VI 6	Fe 94
PX25	3,650	3,080	0,020	0,539	0,030	0,007	-	0,068	0,020	0,016	90% III 5/6 + 10% VI 6	Fe 94

Tab.23. Hodnoty mechanických vlastností vzorků z Ypsilonové zkoušky a jejich metalografická struktura.

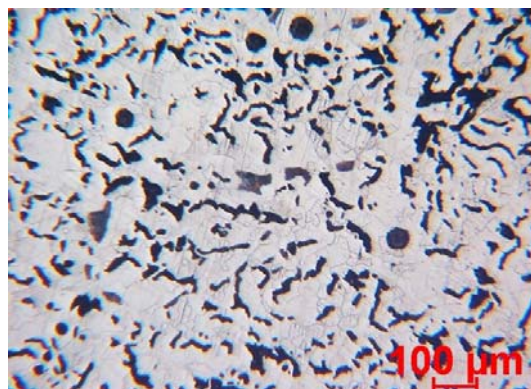
číslo tavby	metalografická struktura			Rm [MPa]	A50[%]	R _{p0,2} [MPa]	σ _I [MPa]	σ _{II} [MPa]
PX15	70% III 5/6 + 30% VI 6	Fe 94	vzorek 1	402	7,73	323	268	287
			vzorek 2	401	8,16	329	267	291
PX17	98% III 5/6 + 2% VI 6	Fe 94	vzorek 1	343	5,43	291	210	255
			vzorek 2	342	5,58	290	220	262
PX18	98% III 5/6 + 2% VI 6	Fe 94	vzorek 1	349	6,17		210	278
			vzorek 2	352	6,09	305		
PX19	95% III 5/6 + 5% VI 6	Fe 94	vzorek 1	320	6,74		177	226
			vzorek 2	321	6,87	260	179	223
PX20	90% III 5/6 + 10% V, VI 6	Fe 94	vzorek 1	369	4,85	314	243	266
			vzorek 2	363	4,46	311	234	271
PX21	I 100% 7,8 D	Fe		184	0,53			
PX23	98% III 6 + 2% VI 6	Fe 94	vzorek 1	357	3,18	269	240	278
			vzorek 2	362	2,53	315	245	277
PX24	60% III 5/6 + 40% VI 6	Fe 94	vzorek 1	381	6,72	316	270	304
			vzorek 2	381	6,76	326		
PX25	90% III 5/6 + 10% VI 6	Fe 94	vzorek 1	377	3,81	332	270	293
			vzorek 2	374	2,89	329	257	285

σ_I.....mez mikroplastických deformací

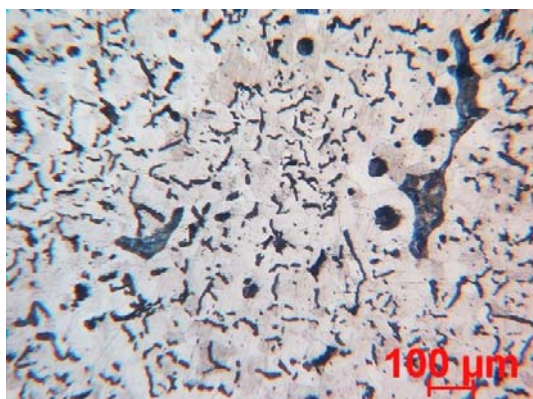
σ_{II}.....mez nestabilního šíření makroplastických deformací



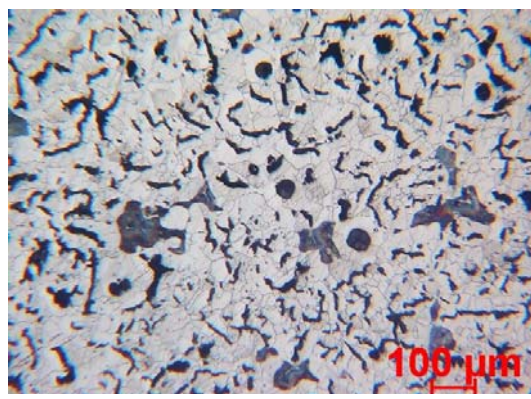
PX15



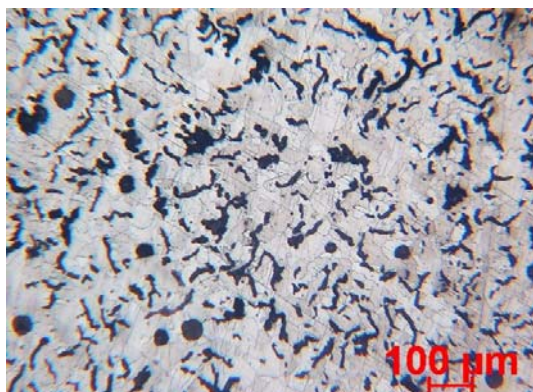
PX17



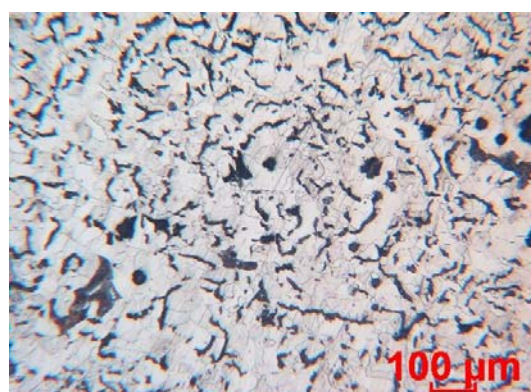
PX18



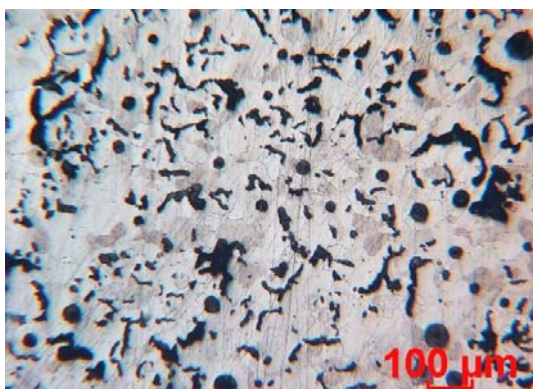
PX19



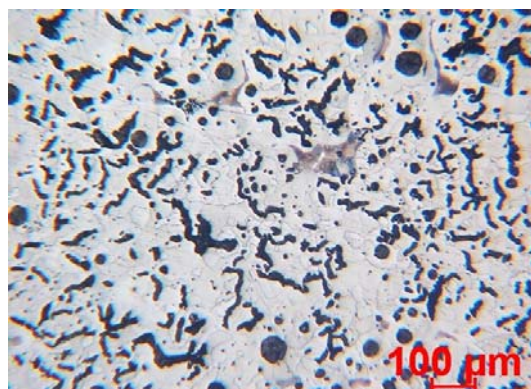
PX20



PX23



PX24



PX25

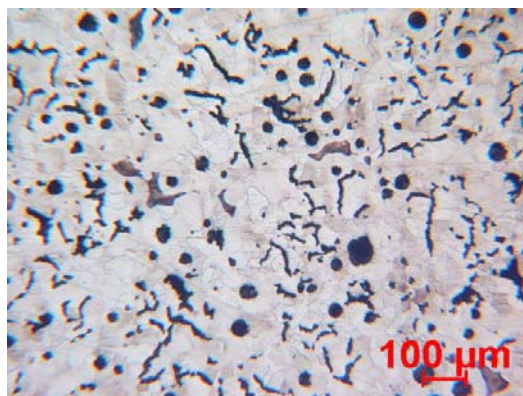
Obr. 28. Snímky mikrostruktur z Ypsilonových zkoušek jednotlivých taveb.
Leptáno 3% Nitalem

V následující *tab.24.* jsou hodnoty pevnosti a tažnosti plochých vzorků s lící kůrou podle *obr.18.* obrobených z plochých destiček daných tloušťek z jednotlivých taveb. Tabulka není kompletní, protože tvrdost některých destiček s tloušťkou pod 5 mm neumožnila jejich obrobení..

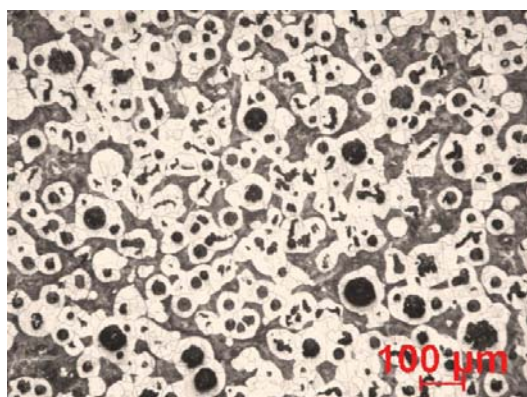
Na obrázcích *obr.29* až *obr.39* jsou snímky metalografických struktur – na každé straně vždy snímek struktury z normalizované Ypsilonové zkoušky a pod ním snímky struktur z destiček s postupně klesající tloušťkou stěny. Vzorky pro snímky struktur z destiček byly odebírány ze středu každé destičky.

Tab. 24. Hodnoty pevností a tažností plochých vzorků s lící kůrou obrobených z plochých destiček daných tloušťek z jednotlivých taveb

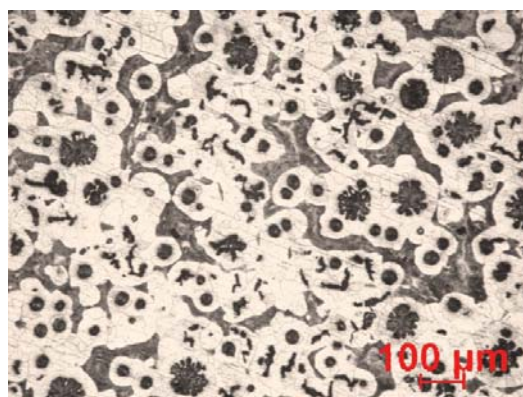
číslo tavby		3 mm	4 mm	5 mm	7 mm	10 mm
PX15	Rm [Mpa]			507	332	324
	A [%]			2,33	0,82	0,90
PX17	Rm [Mpa]		374	288	228	209
	A [%]		0,22	0,10	0,03	0,02
PX18	Rm [Mpa]	459	411	380	304	319
	A [%]	1,35	0,77	0,87	0,25	1,31
PX19	Rm [Mpa]		373	369	141	260
	A [%]		0,20	0,39	0,07	0,11
PX20	Rm [Mpa]		408	445	336	363
	A [%]		0,84	3,28	0,88	1,55
PX23	Rm [Mpa]		339	377	304	329
	A [%]		0,22	0,70	0,37	1,67
PX23+	Rm [Mpa]	453	337	335	278	301
	A [%]	0,70	0,07	0,27	0,11	0,39
PX24	Rm [Mpa]			274	262	329
	A [%]			0,52	0,39	1,26
PX24+	Rm [Mpa]	557	499	352	390	408
	A [%]	4,66	5,92	0,88	3,58	6,25
PX25	Rm [Mpa]				329	350
	A [%]				0,84	1,21
PX25+	Rm [Mpa]	503	460	407	284	304
	A [%]	1,84	1,32	0,91	0,25	0,92



Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX15

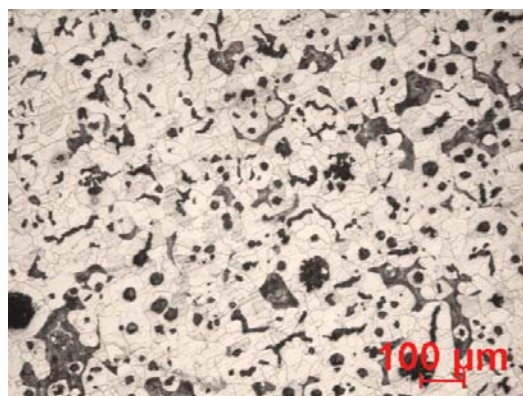


destička 5mm

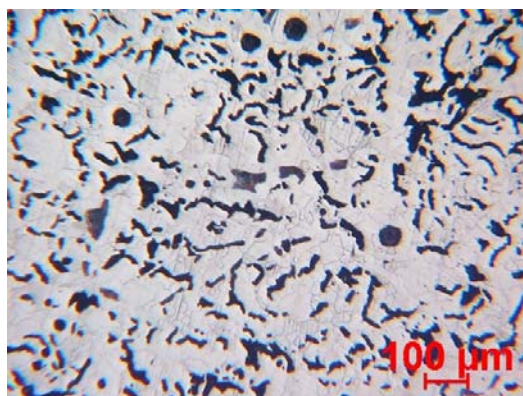


destička 7mm

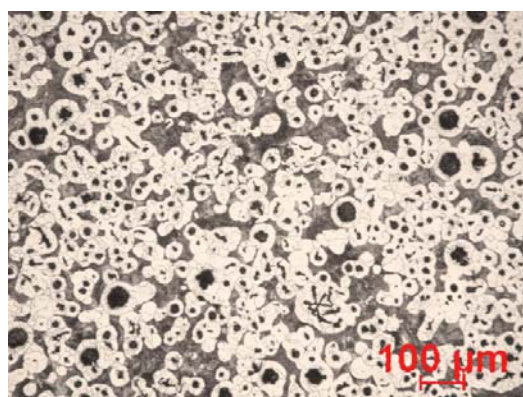
*Obr.29. Snímky struktur z tavby PX15.
Leptáno 3% Nital*



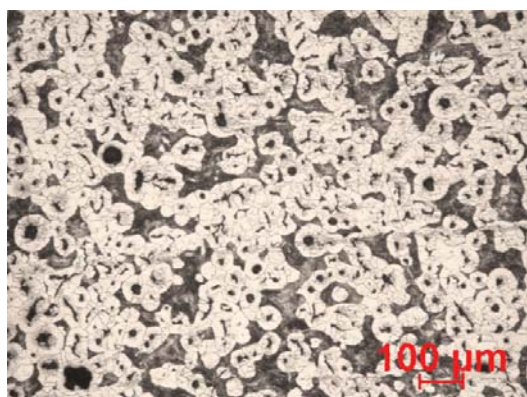
destička 10mm



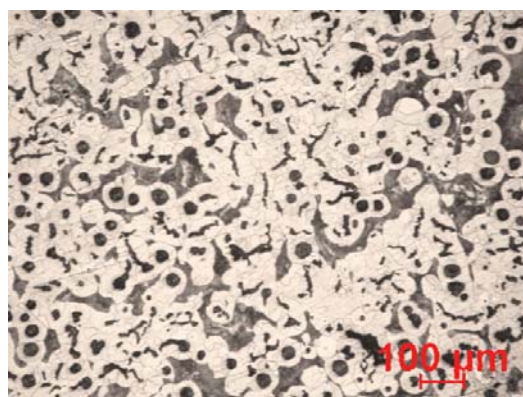
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX17



destička 4mm

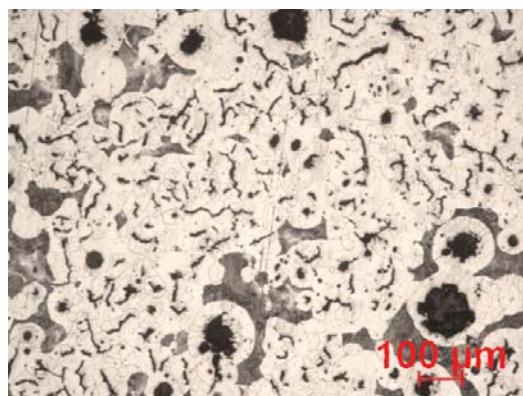


destička 5mm

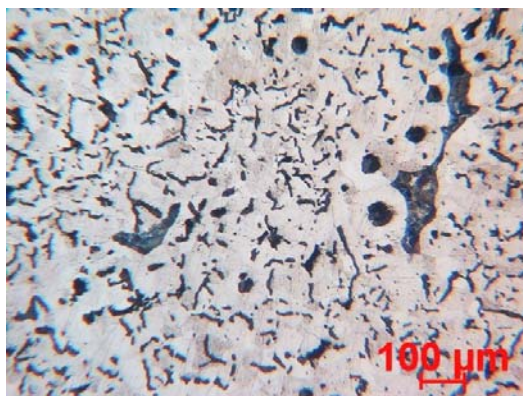


destička 7mm

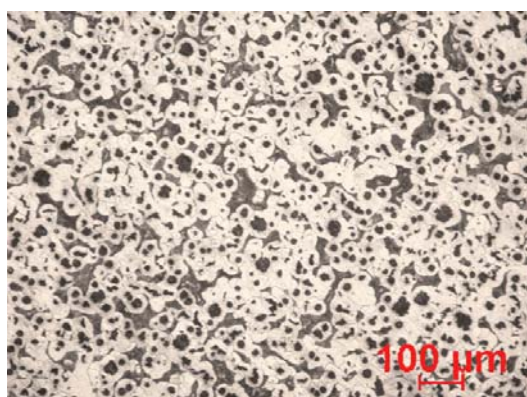
*Obr.30. Snímky struktur z tavby PX17.
Leptáno 3% Nital*



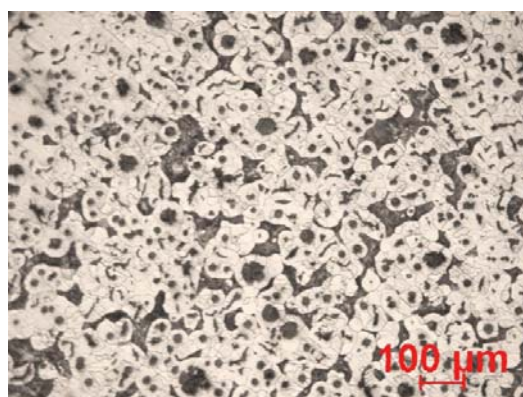
destička 10mm



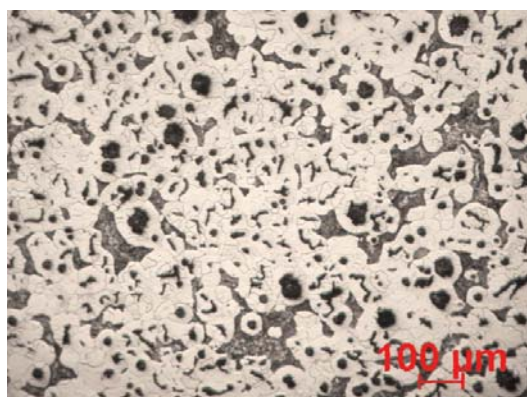
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX18



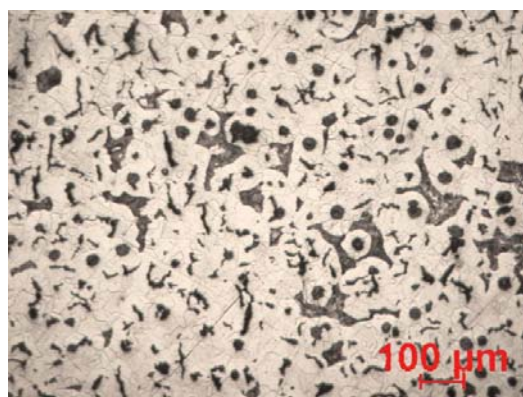
destička 3mm



destička 4mm

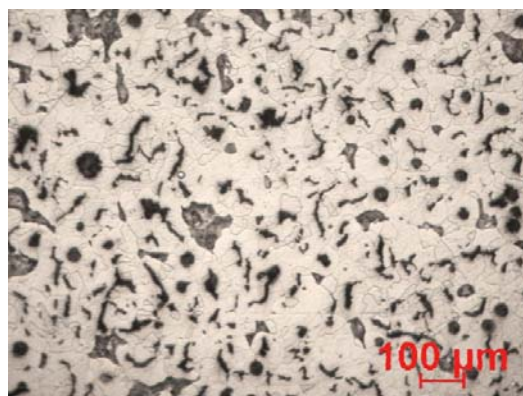


destička 5mm

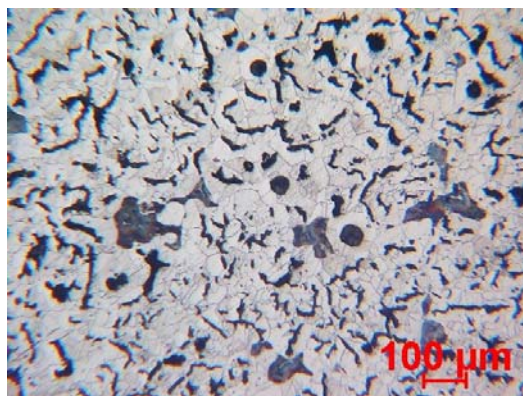


destička 7mm

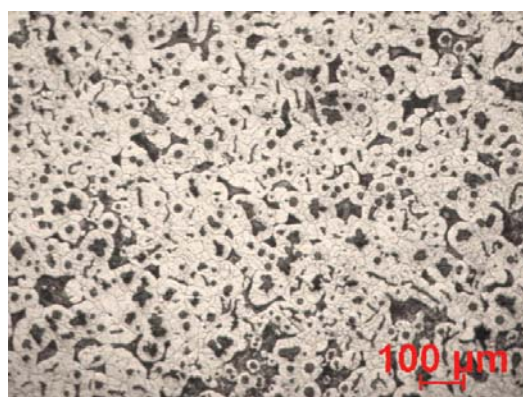
*Obr.31. Snímky struktur z tavby PX18.
Leptáno 3% Nitale*



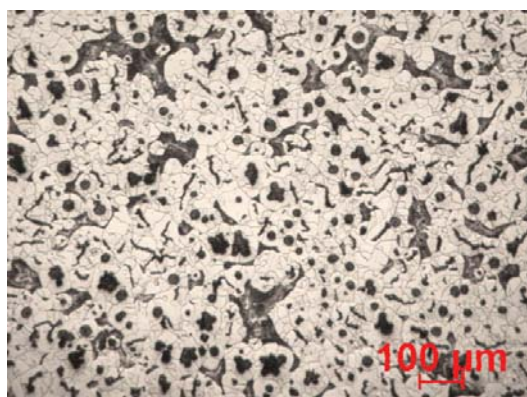
destička 10mm



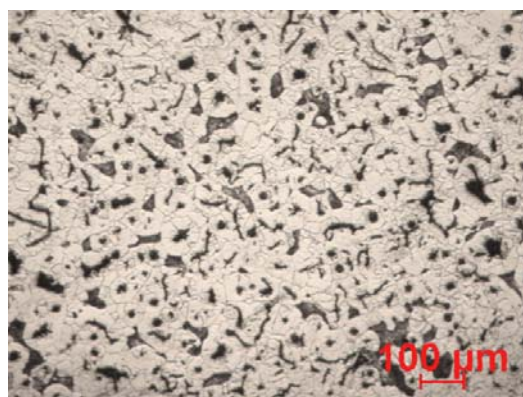
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX19



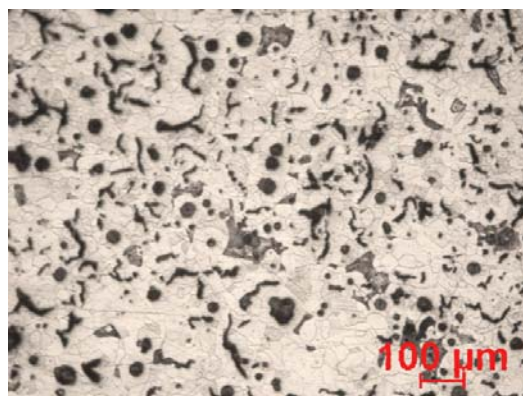
destička 4mm



destička 5mm

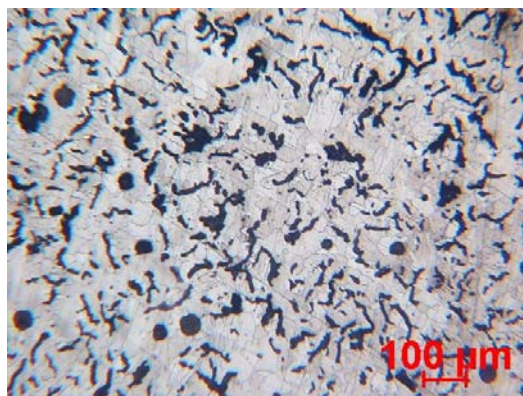


destička 7mm

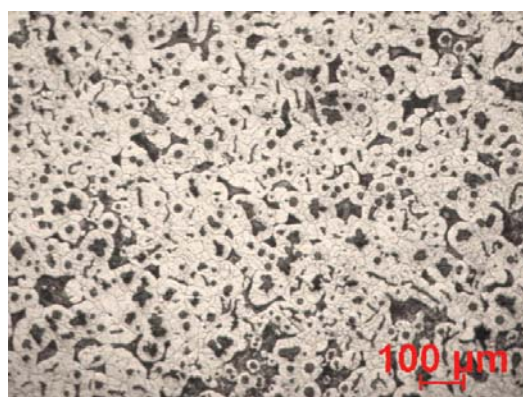


destička 10mm

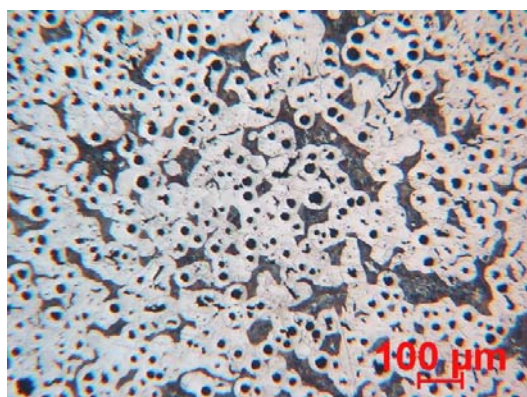
*Obr.32. Snímky struktur z tavby PX19.
Leptáno 3% Nital*



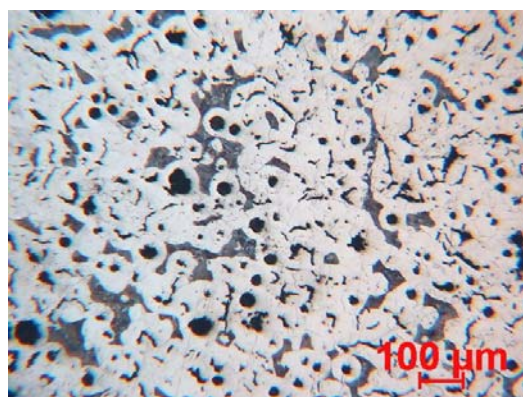
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX20



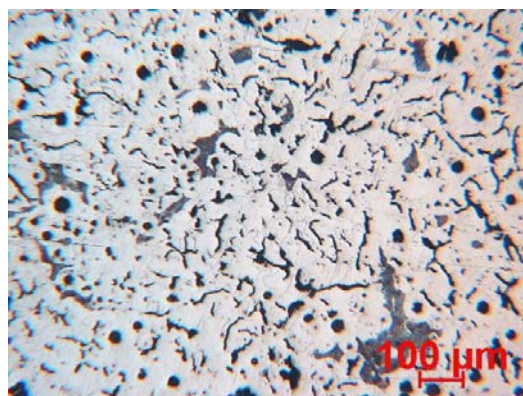
destička 4mm



destička 5mm

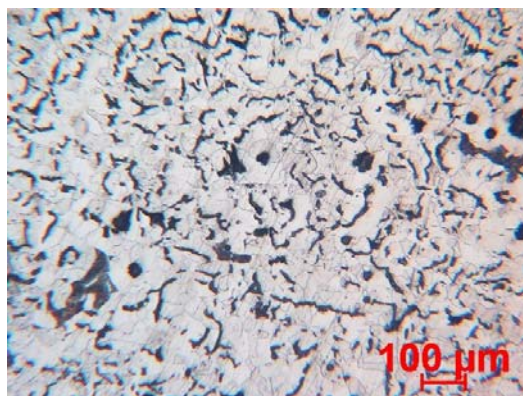


destička 7mm

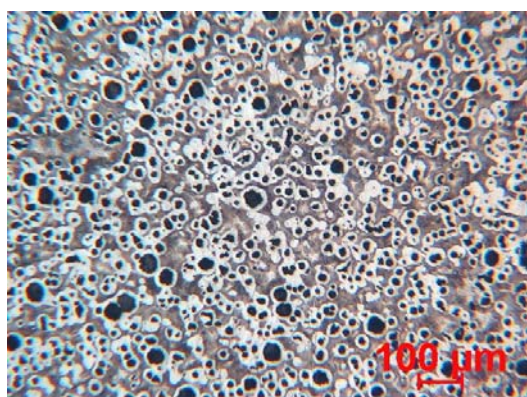


destička 10mm

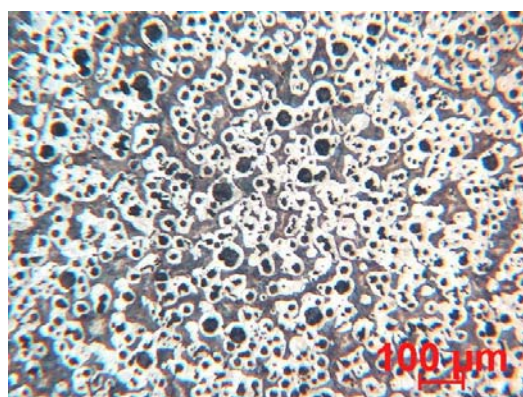
*Obr.33. Snímky struktur z tavby PX20.
Leptáno 3% Nitale*



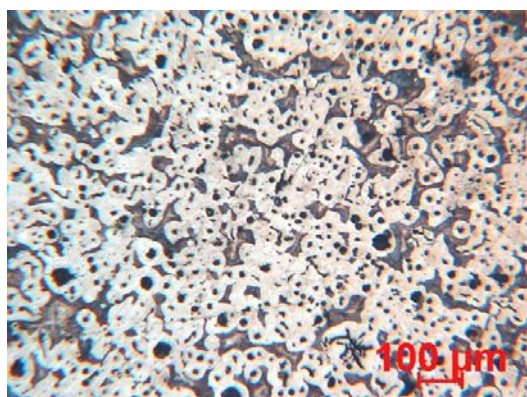
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX23



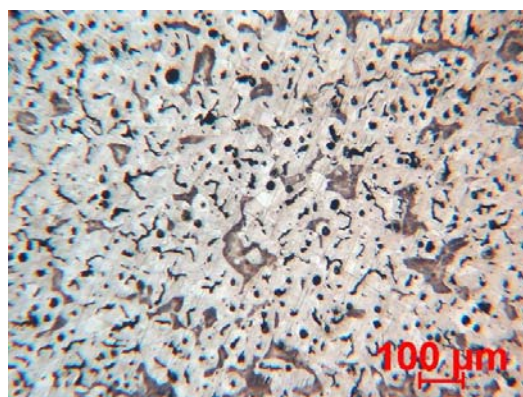
Destička 3mm



destička 4mm

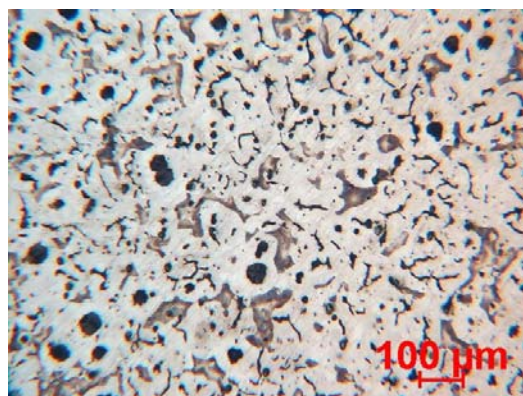


destička 5mm

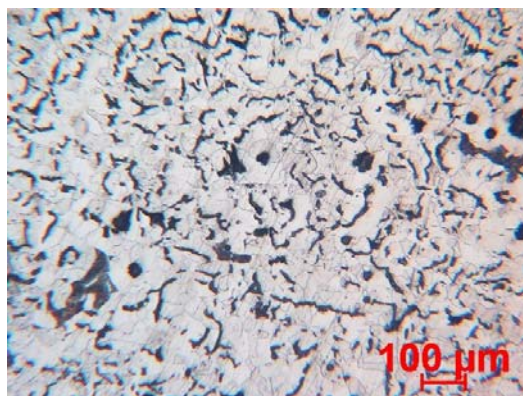


destička 7mm

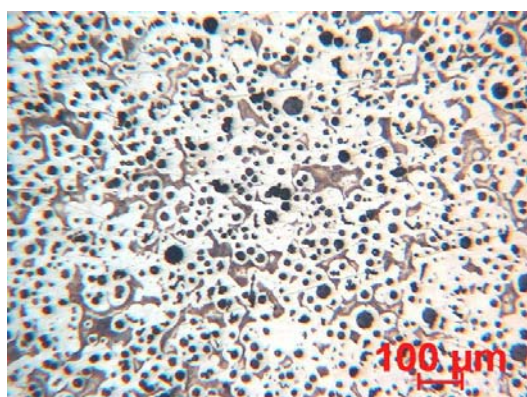
Obr.34. Snímky struktur z tavby PX23.
Leptáno 3% Nital



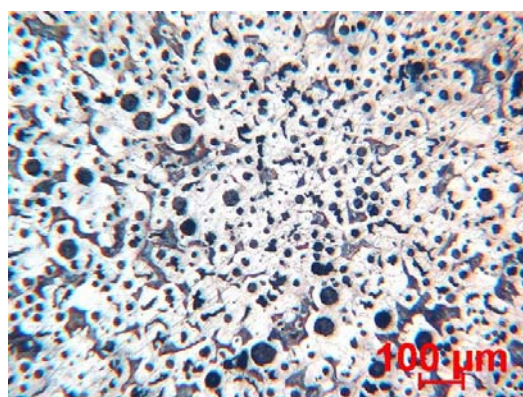
destička 10mm



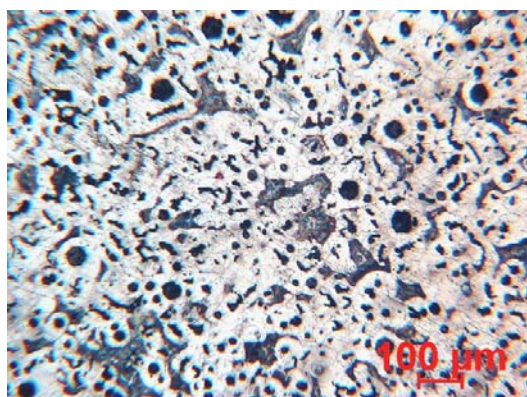
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX23+



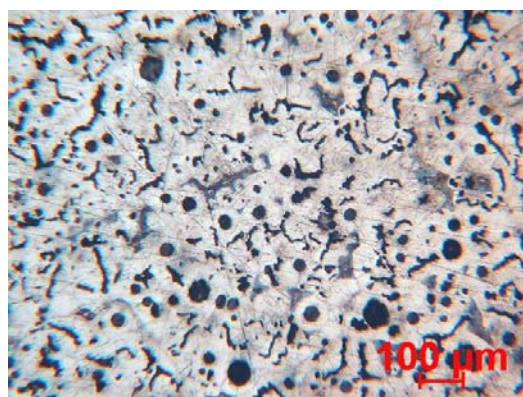
Destička 3mm



destička 4mm

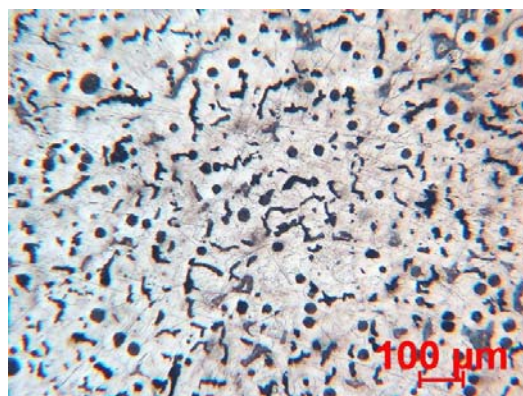


destička 5mm

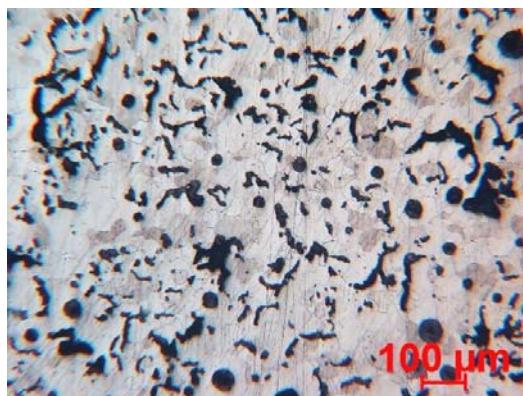


destička 7mm

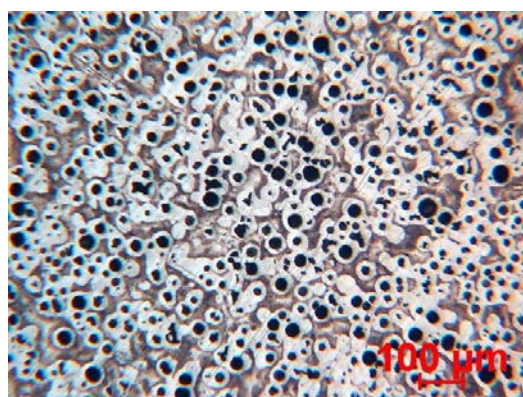
Obr.35. Snímky struktur z tavby PX23+.
Leptáno 3% Nital



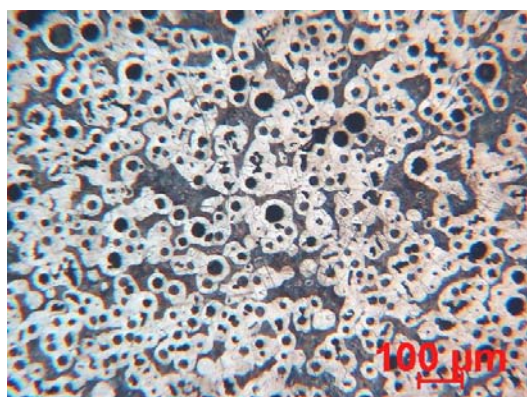
destička 10mm



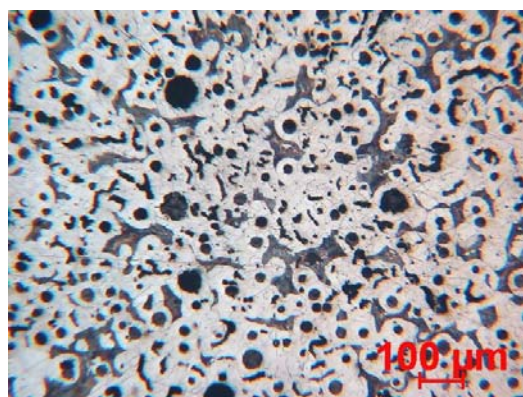
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX24



destička 4mm

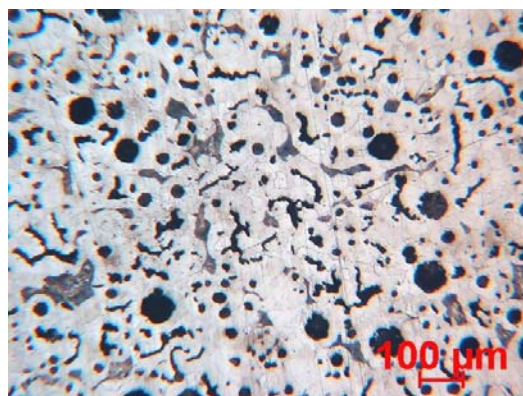


destička 5mm

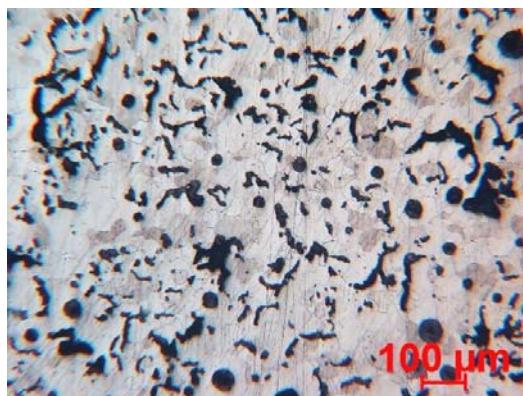


destička 7mm

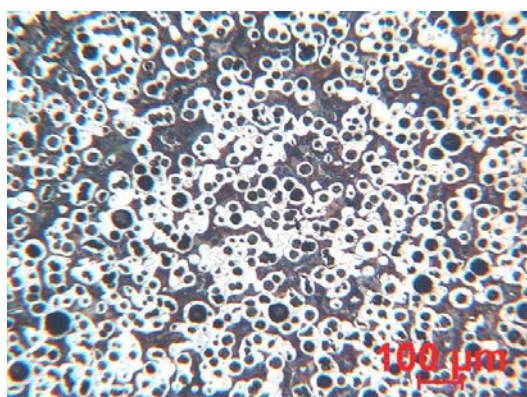
*Obr.36. Snímky struktur z tavby PX24.
Leptáno 3% Nitale*



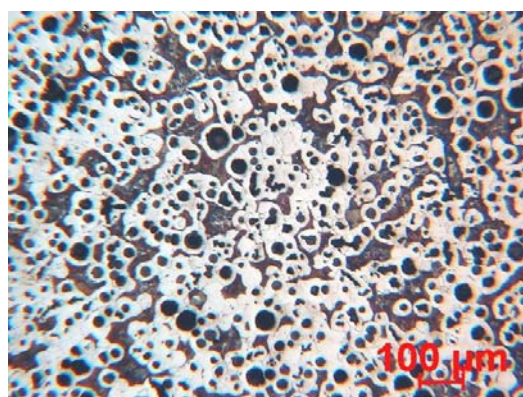
destička 10mm



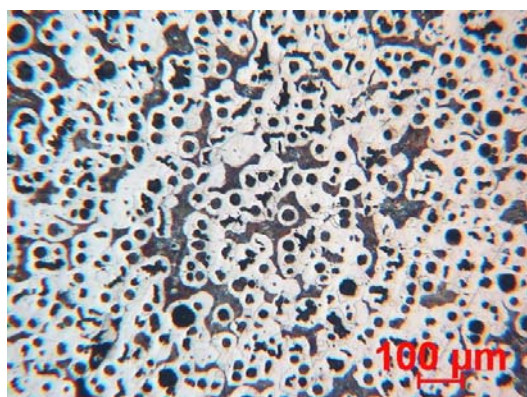
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX24



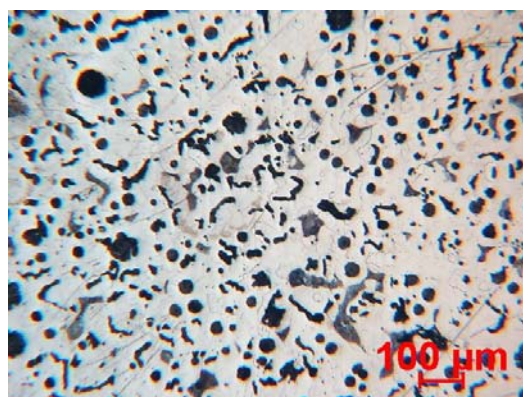
Destička 3mm



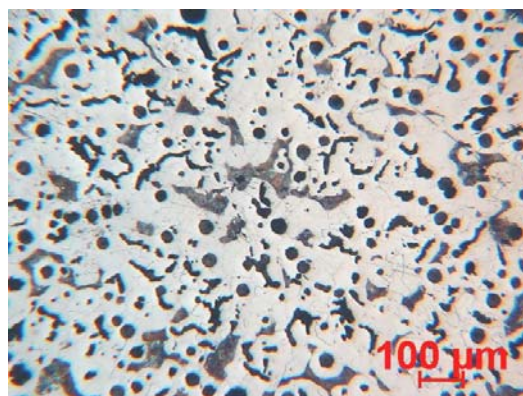
destička 4mm



destička 5mm

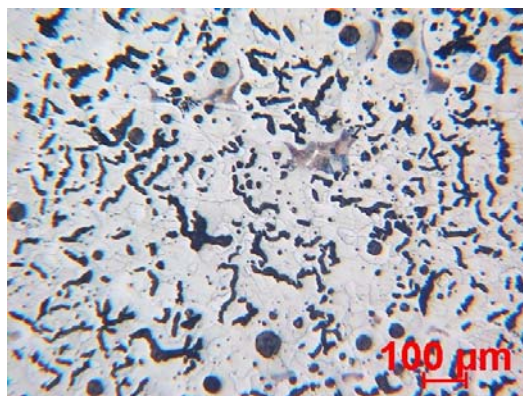


destička 7mm

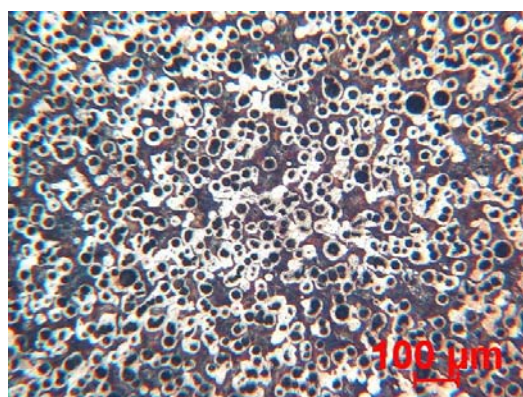


destička 10mm

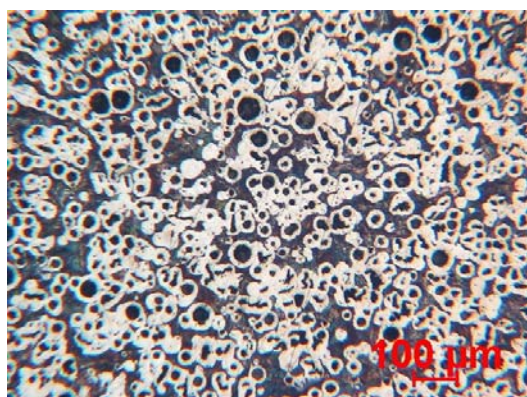
*Obr.37. Snímky struktur z tavby PX24+.
Leptáno 3% Nital*



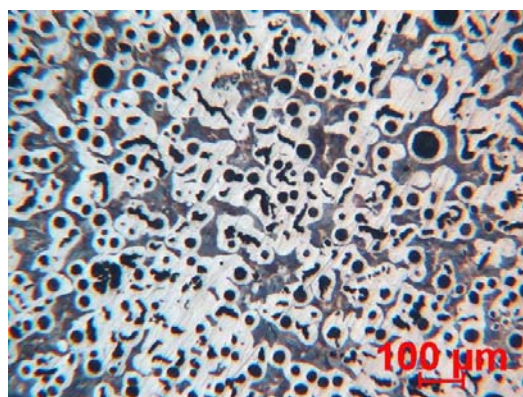
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX25



destička 4mm

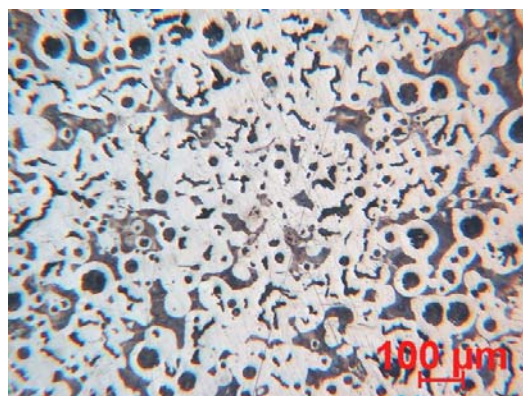


destička 5mm

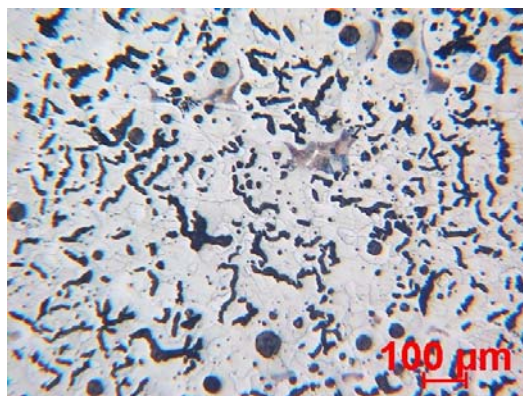


destička 7mm

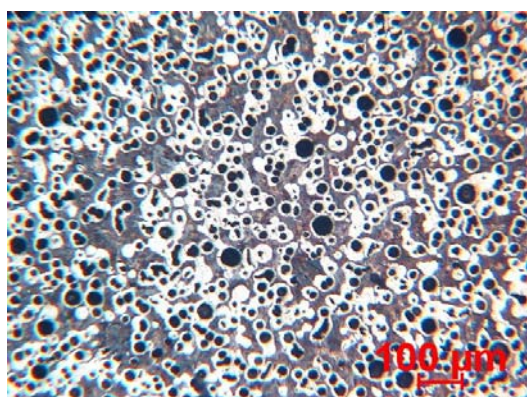
*Obr.38. Snímky struktur z tavby PX25.
Leptáno 3% Nital*



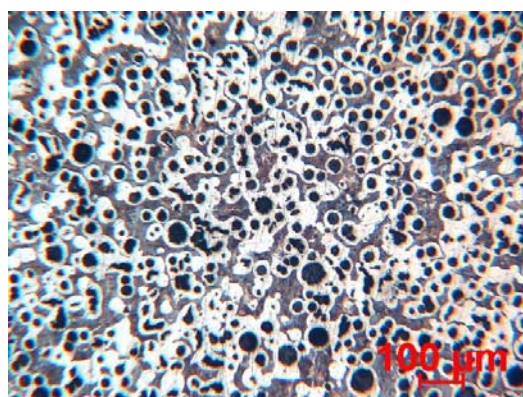
destička 10mm



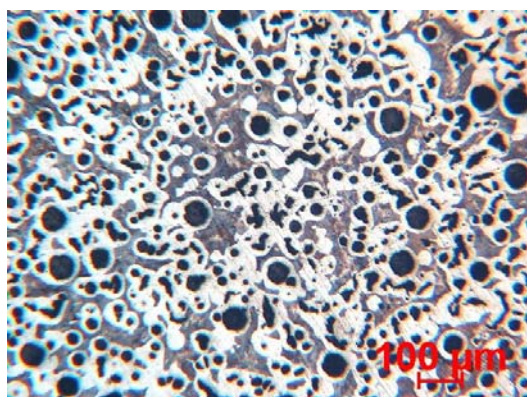
Mikrostruktura z Ypsilonové zkoušky tavby PX25



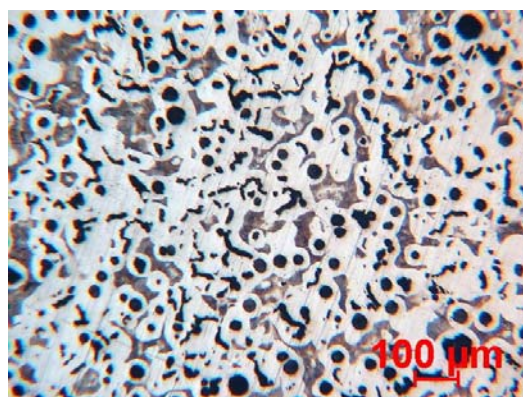
Destička 3mm



destička 4mm

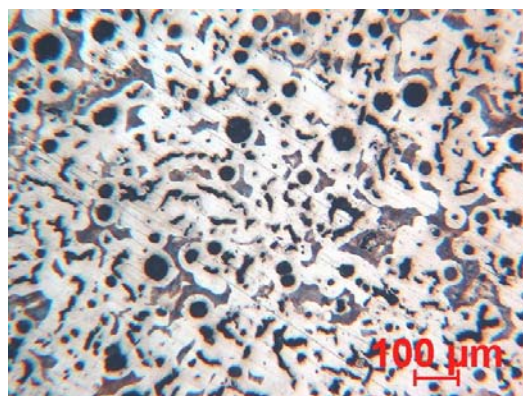


destička 5mm



destička 7mm

*Obr.39. Snímky struktur z tavby PX25+.
Leptáno 3% Nital*



destička 10mm

6.6. MĚŘENÍ AKTIVITY KYSLÍKU

Hlavním úkolem práce bylo zvládnout technologii výroby tenkostěnných odlitků, avšak pozornost byla v průběhu experimentů věnována i možnosti operativní průběžné kontroly jakosti litiny, konkrétně měření aktivity kyslíku. Záměrem měření tohoto parametru bylo pouze doplnění metalurgických aspektů výroby LČG.

Touto problematikou se na TU v Liberci zabýváme již několik let a za tu dobu vzniklo několik prací zabývajících se prokázáním souvislostí mezi aktivitou kyslíku a správným průběhem modifikace, potažmo vznikem požadovaného tvaru grafitu ve výsledné litině [12,33]. Metodika měření aktivity kyslíku byla vypracována na základě poznatků při řešení mé diplomové práce.

Přídavek všech modifikačních prvků díky jejich vysoké afinitě ke kyslíku výrazně snižuje aktivity kyslíku v litině [12,33,34]. V roztavené litině existuje rovnováha mezi množstvím rozpuštěného modifikátoru a kyslíku. Určení vztahu mezi množstvím rozpuštěného modifikátoru a aktivitou kyslíku by tedy mělo umožnit monitorovat účinnost modifikace pomocí měření aktivity kyslíku. Dosavadní práce ukazují, že pomocí měření aktivity kyslíku a teploty je možné odhadnout budoucí tvar grafitu [12,33,34,35]. Měření aktivity kyslíku ve zpracované litině tedy umožňuje kontrolu správné modifikace ještě před odlitím a dává tak možnost k dodatečné úpravě taveniny. Je ovšem třeba experimentálně určit kriteria pro tvorbu určitých typů grafitu. Většina dosavadních prací provedených na TU v Liberci [12,33] se zabývala touto závislostí výhradně u litin zpracovávaných pomocí hořčíku.

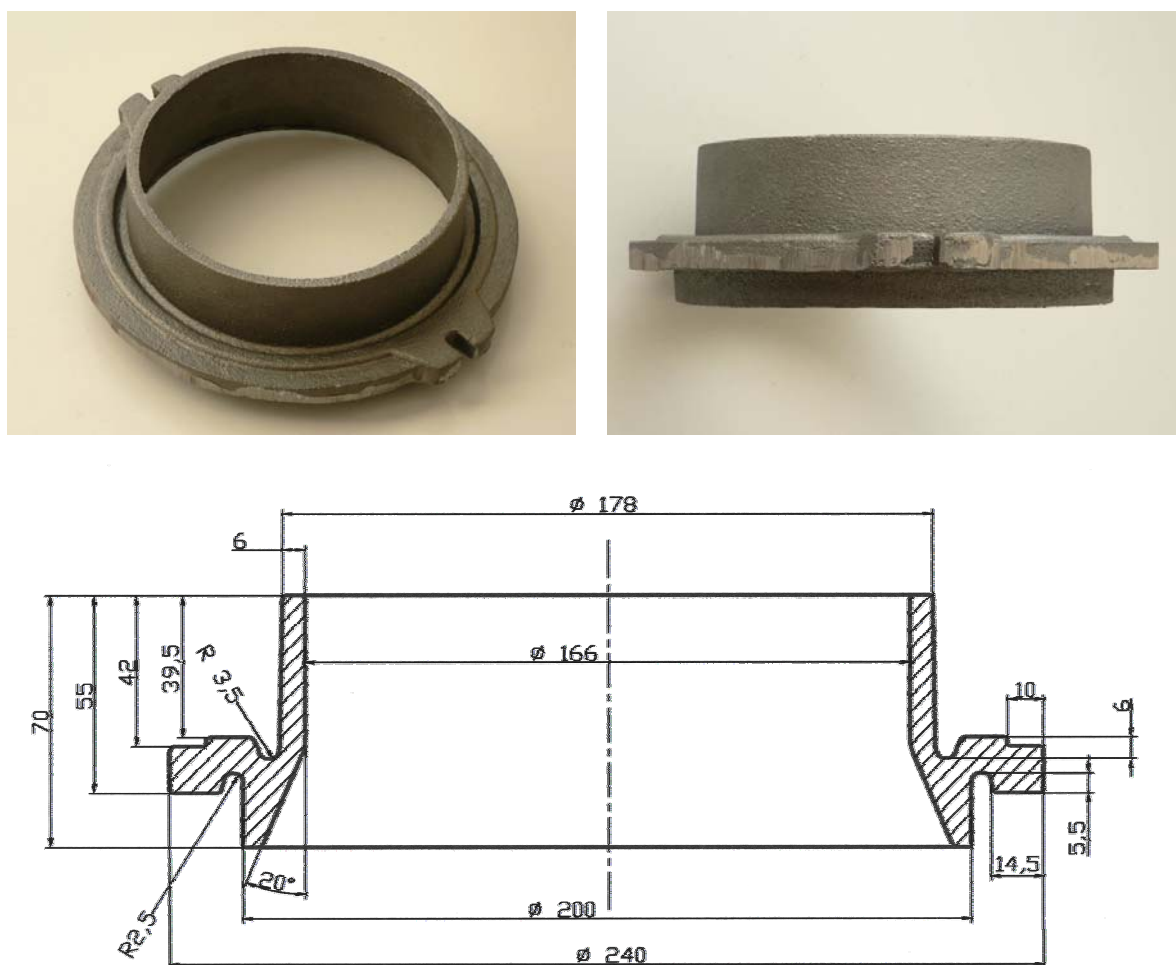
V této práci byly jako modifikátor použity neseparované Kovy vzácných zemin, pro které v dostupné literatuře nebyla nalezena kritéria pro tvorbu určitých typů grafitu. Za tímto účelem byla navržena řada taveb opět s odstupňovaným množstvím modifikátoru, na kterých se v průběhu modifikace a po jejím ukončení měřila aktivita kyslíku, kterou by bylo následně možné porovnávat s dosaženou strukturou ve zkušebních odlitcích.

Již při prvních dvou tavebách jsme však narazili na překážky, díky kterým byly experimenty s kvalitním výsledkem jen obtížně proveditelné. Hlavní problém měření aktivity spočíval v tom, že během měření aktivity kyslíku ve zpracovací pánvi došlo k takovému poklesu teploty, že nebylo možné následně odlévat zdravé odlitky s tloušťkou stěny 3 až 4 mm s požadovanou strukturou. Na druhou stranu při vyšším přehřátí taveniny došlo často ke znehodnocení sondy dříve než byly naměřeny požadované hodnoty, navíc byla vysokým přehřátím značně snížena kvalita odlévané litiny.

Proto jsme v průběhu dalších experimentů od měření aktivity kyslíku upustili a nadále se soustředili především na technologické aspekty produkce tenkostěnných odlitků s požadovanou strukturou z takto modifikované litiny.

6.7. ZHOTOVENÍ PRAKTICKÉHO ODLITKU Z LČG

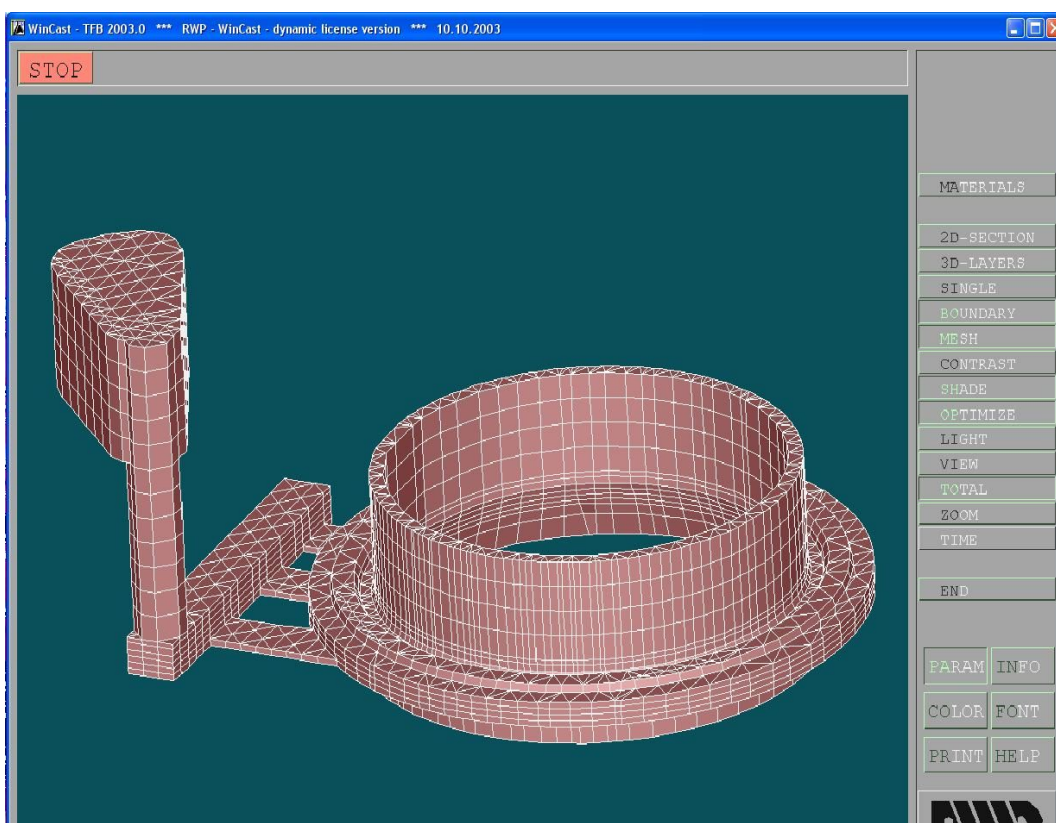
Aby bylo možné dosavadní poznatky získané z předchozích taveb zobecnit, bylo třeba je ověřit při výrobě skutečného tenkostěnného odlitku s proměnlivými tloušťkami stěn. Za tímto účelem byl vybrán odlitek z produkce Komerční slévárny šedé a tvárné litiny TURNOV. Jedná se o spojku na potrubí pro vedení horkých plynů. Díl má cylindrický tvar s přírubou a proměnlivé tloušťky stěn od 5 do 10 mm viz *obr.40*. To umožnilo sledovat chování materiálu v tenkých stěnách reálného odlitku jednoduchého tvaru.



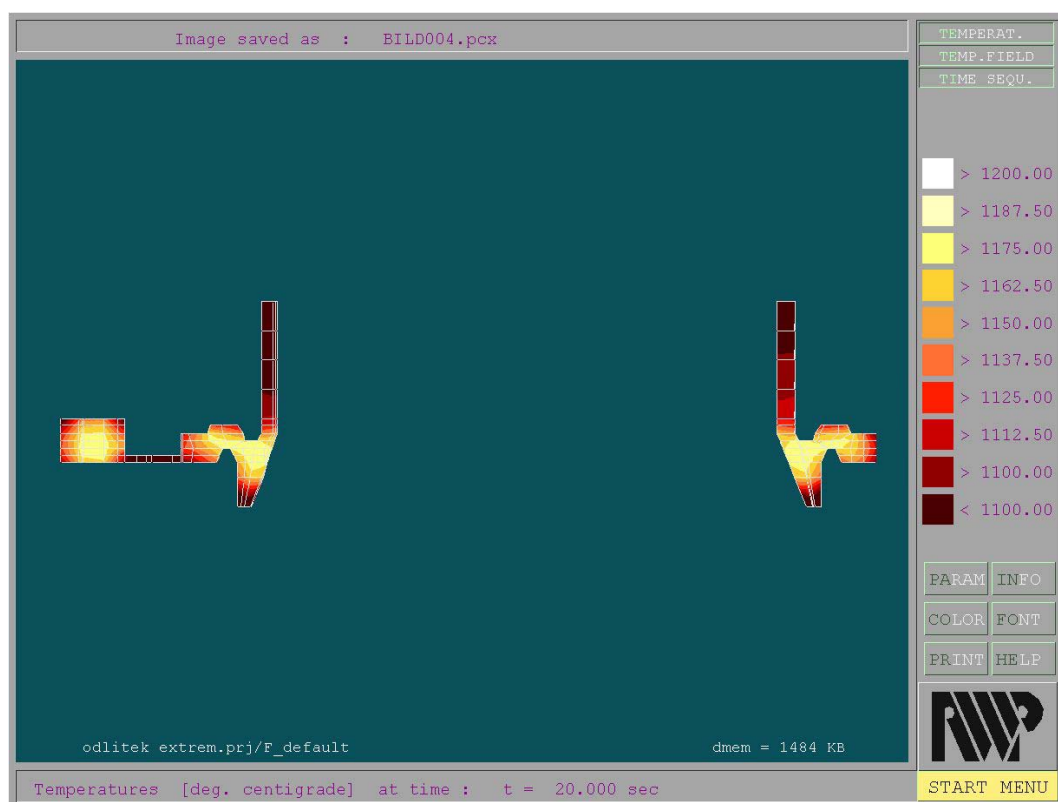
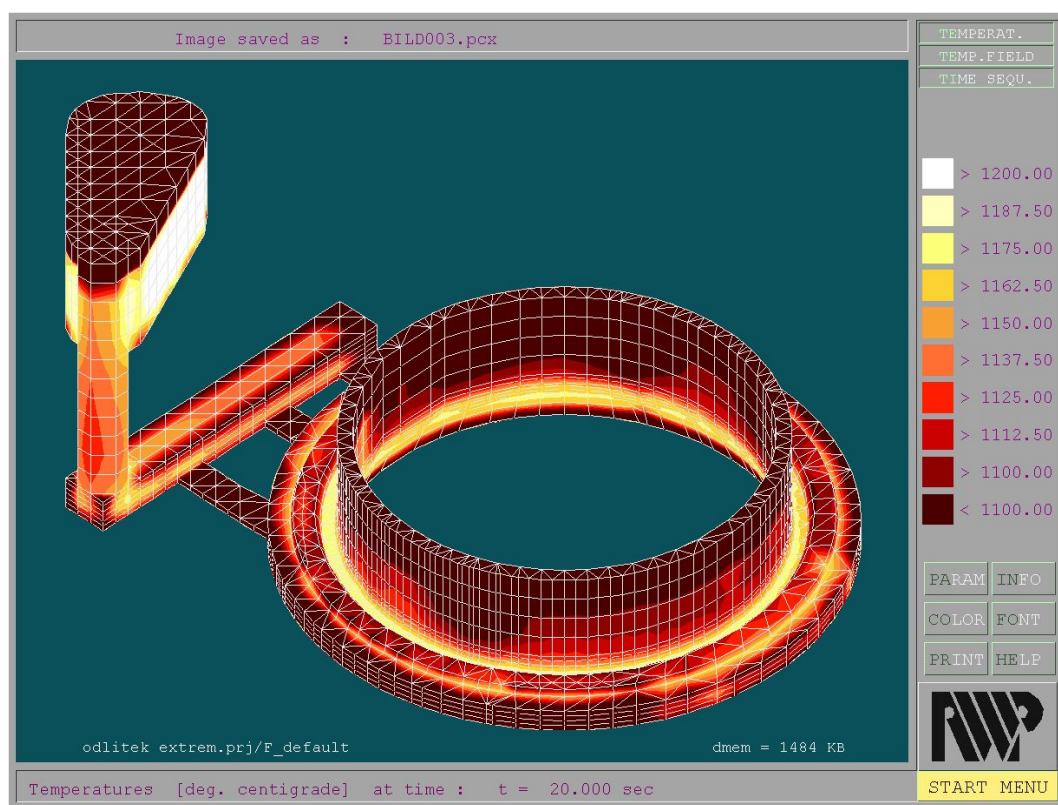
Obr.40. Zkušební odlitek spojky na potrubí

Formování do pískové formovací směsi, tavení i odlévání proběhlo opět v dílnách katedry strojírenské technologie na TU v Liberci při použití stejných vsázkových surovin, očkovaadel i modifikátorů jako v předchozích tavrách. Složení vsázky a výsledné chemické složení jsou uvedeny v *tab.25* a *tab.26*.

Pro návrh vhodné vtokové soustavy byl opět použit simulační software Wincast. V rámci programu bylo odzkoušeno zavtokování 6 zářezy po celém obvodu odlitku, poté dva vtoky na protilehlých částech a nakonec připojení několika zářezů pouze z jedné strany odlitku. Poslední varianta se ukázala naprosto dostačující, takže odlitek byl nakonec zavtokován pouze z jedné strany připojením tří zářezů do příruby, která má největší tloušťku viz *obr.41*. I přes vtoky pouze z jedné strany a absenci nálitků bylo podle výpočtů teplotní pole ve všech částech odlitku velmi vyrovnané a odlitek tuhnul rovnoměrně viz *obr.42*. Materiál původního odlitku byla litina s kuličkovým grafitem a odlitek nebyl nijak nálitkován. Protože LČG by měla stahovat méně, nebyly ani v našem případě použity žádné nálitky.



Obr.41. Model odlitku s vtokovou soustavou použitý pro simulační výpočet



Obr.42. Teplotní pole odlitku v čase 20s od počátku lití

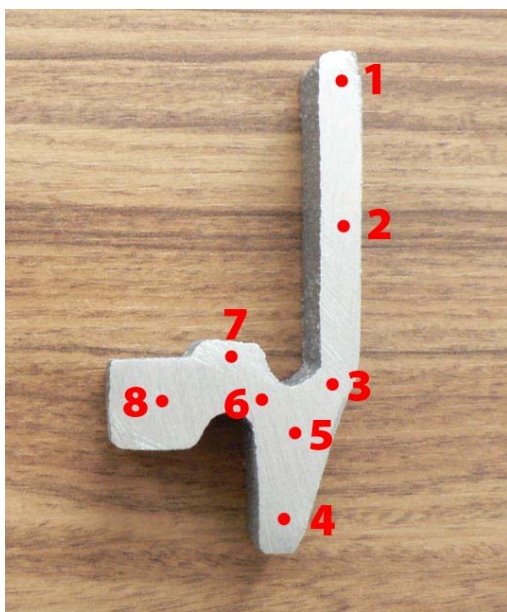
Tab.25. Složení vsázky zkušebního odlitku

Název tavby	Sorel [kg]	KVZ [kg]	KVZ [%]	FeSi75 [kg]	FeSi75 [kg]	Superseed [kg]
Odlitek	25	0,0065	0,026	0,70	0,20	0,2

Tab.26. Výsledné chemické složení tavby

název tavby	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]	Přidané KVZ [%]	Ce [%]	La [%]
Odlitek	3,670	3,060	0,180	0,012	0,031	0,005	0,056	0,019	0,014

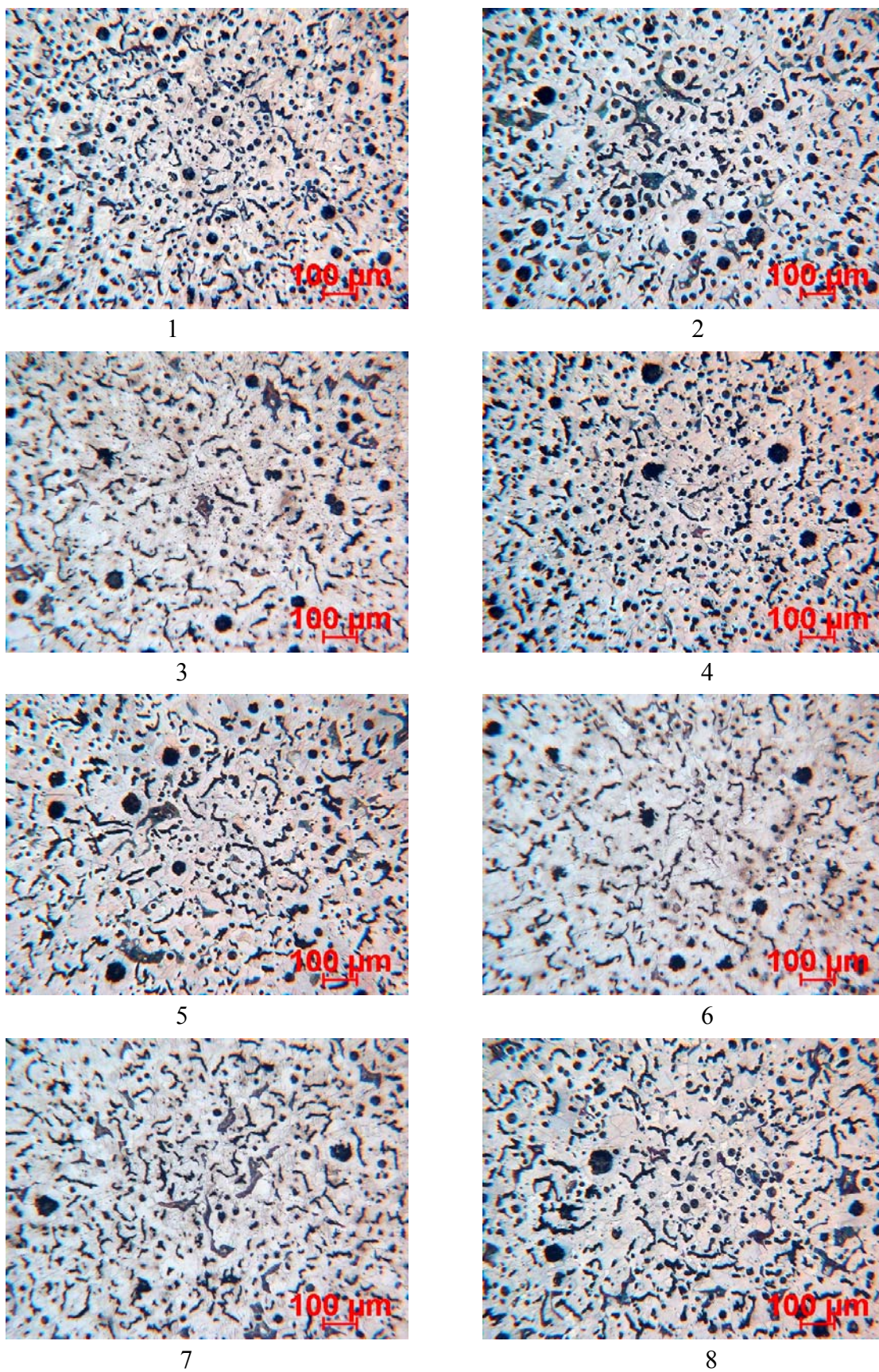
Z hotového odlitku byly vyříznuty dva vzorky pro měření tvrdosti a zjištění mikrostruktury. Vzorek I byl odebrán u vtoku, vzorek II na opačné straně odlitku. Na obr.43 je zobrazen jeden ze vzorků s vyznačenými a očíslovanými místy, na kterých byla měřena tvrdost a zjišťována mikrostruktura. V tab.27 jsou potom uvedeny hodnoty naměřených tvrdostí a na obr.44 snímky metalografických struktur z uvedených míst.



Tab.27. Hodnoty tvrdostí vzorků I a II

Označení místa	Tvrdost [HB]	
	Vzorek I	Vzorek II
1	180	177
2	177	180
3	174	180
4	177	174
5	174	177
6	174	177
7	170	170
8	174	170

Obr.43. Výřez z odlitku s očíslovanými místy, na kterých byla měřena tvrdost a zjišťována mikrostruktura



Obr.44. Snímky metalografických struktur z míst 1 až 8 z výřezu spojky na potrubí.
Leptáno 3% Nital

7. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Prvním úkolem práce bylo určit *pásmo optimálního působení modifikátoru na bázi neseparovaných KVZ*. To znamená určit množství modifikátoru pro získání požadovaného tvaru grafitu – v našem případě červíkovitého grafitu bez výskytu lupínkového grafitu a zároveň s co nejnižším výskytem grafitu zrnitého.

Ačkoliv bylo množství KVZ v první řadě taveb určováno pouze přidávaným množstvím, bylo možné podle výsledků na *obr.24* celkem jednoznačně určit interval potřebného množství modifikátoru, které se pohybovalo v rozmezí od 0,05 do 0,08 hm.%. Dalšího zpřesnění intervalu bylo dosaženo seřazením taveb z výběrového souboru viz. *tab.22* podle výsledného analyzovaného množství Ce a La. Podle takto upravené tabulky *tab.28* lze interval zpřesnit na rozmezí 0,025 až 0,036 % zbytkového Ce a La. To odpovídá množství 0,052 až 0,068% KVZ přidávaných jako modifikátor.

Při použití již nepatrně menšího množství modifikátoru v tavnici PX21 vedlo ke vzniku naprosto nepřijatelné struktury s lupínkovým grafitem. Na druhé straně větší přidávaná množství se projeví výrazným nárůstem podílu zrnitého grafitu a značným nárůstem výskytu nežádoucího volného cementitu ve struktuře a s tím souvisejícím zvýšením tvrdosti vzorků.

Tab.28. Tavnice z výběrového souboru seřazené podle zbytkového obsahu Ce a La

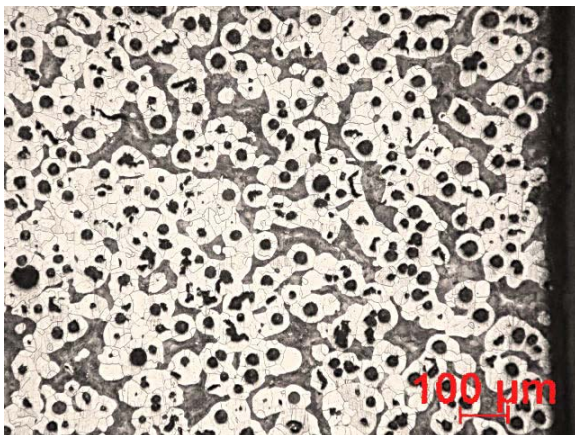
číslo tavnice	Přidané KVZ [%]	Ce [%]	La [%]	metalografická struktura	
PX19	0,024	0,005	0,003	95% III 5/6 + 5% VI 6	Fe 94
PX18	0,026	0,007	0,004	98% III 5/6 + 2% VI 6	Fe 94
PX21	0,044	0,014	0,009	I 100% 7,8 D	Fe
PX20	0,060	0,015	0,010	90% III 5/6 + 10% V, VI 6	Fe 94
PX17	0,052	0,016	0,010	98% III 5/6 + 2% VI 6	Fe 94
PX23	0,064	0,016	0,010	98% III 6 + 2% VI 6	Fe 94
PX15	0,056	0,020	0,014	70% III 5/6 + 30% VI 6	Fe 94
PX25	0,068	0,020	0,016	90% III 5/6 + 10% VI 6	Fe 94
PX24	0,072	0,022	0,016	60% III 5/6 + 40% VI 6	Fe 94

Celkově se potvrdila nutnost důkladného očkovaní takto zpracované taveniny. V průběhu experimentálních taveb se jako nejúčinnější ukázalo použití dvoustupňového očkovaní v množství 0,8% FeSi75 ve zpracovací pánvi při přelévání a 0,8% Superseedu těsně před odléváním.

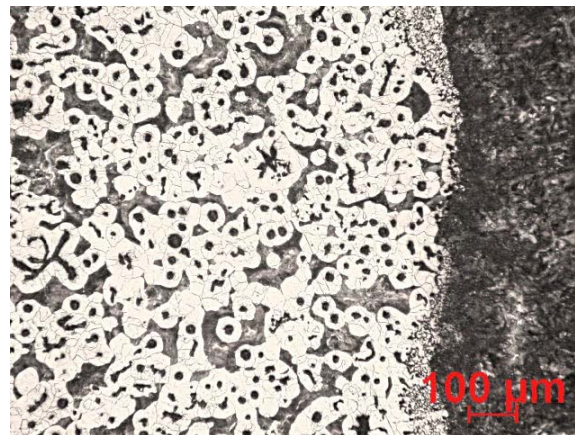
Úkolem číslo dvě, bylo zhodnotit *vliv základních legujících prvků Mn a Cu* běžně používaných pro zvýšení mechanických vlastností litiny. Bylo tedy třeba porovnat tavby se zvýšeným obsahem Mn, tzn. tavby PX15 a PX23 s tavbami bez těchto prvků.

Při srovnávání hodnot mechanických vlastností vzorků z Ypsilonové zkoušky bylo sice zjištěno, že tavba PX15 s nejvyšším obsahem Mn má i nejvyšší pevnost a tažnost, ale v tomto případě je třeba tento nárůst připsat vlivu vyššího procenta zrnitého grafitu u PX15. Tuto domněnku podporuje i fakt, že druhá tavba se zvýšeným obsahem Mn PX23 má zase hodnoty pevnosti a tažnosti mírně nižší než tavby bez legur PX20 a PX25. Vysvětlení je opět v obsahu zrnitého grafitu ve struktuře, ten je u PX20 i PX25 vyšší. Stejný efekt je pozorovatelný i u výsledků mechanických vlastností vzorků z tenkých destiček. V provedených experimentech je tedy celkový efekt obsahu Mn do 0,4% převážen vlivem obsahu zrnitého grafitu. Navíc zvýšený obsah Mn vedl u taveb k nežádoucímu nárůstu tvrdosti u destiček s tloušťkou pod 5mm.

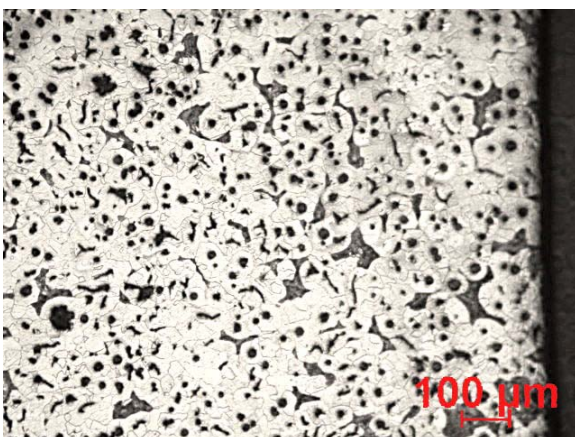
Poněkud odlišná je situace u vlivu Cu na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Zatímco u vzorků z Ypsilonové zkoušky je vliv Cu opět díky různému obsahu zrnitého grafitu u vzorků neprokazatelný, u vzorků z tenkých destiček s lící vrstvou se obsah Cu projevil u všech vzorků poklesem mechanických vlastností, zejména tažnosti. Všeobecně je známo, že Cu stabilizuje perlit, který má velmi nízkou tažnost. Avšak všechny tavby v našem výběrovém souboru měly ve vzorcích z Ypsilonové zkoušky přibližně stejný procentuální obsah perlitu. Vzhledem k tomu, že došlo u tenkých vzorků především k prudkému poklesu tažnosti, bylo třeba hledat příčinu ve výskytu určitého druhu vad u těchto odlitků. Byly proto dodatečně pořízeny snímky metalografické struktury znázorňující i povrchovou „lící kůru“ odlitků. Na *obr.45* jsou pro srovnání zobrazeny tři páry snímků mikrostruktur z destiček různých tloušťek. První snímek vždy patří vzorku z tavby bez Cu a druhý snímek vzorku z tavby s přidavkem Cu. Ze všech snímků je dobře patrný značný nárůst tloušťky povrchové vrstvy s výrazně odlišnou strukturou jak grafitu, tak základní kovové hmoty. Na *obr.46* je snímek pořízený s pětisetnásobným zvětšením této povrchové vrstvy, který ukazuje že vrstva je tvořena výhradně perlitickou strukturou ve které je uložen růžicovitý lupínkový grafit! Tento výrazný zásah do celkové homogenity struktury odlitku patrně vede ke značnému poklesu mechanických vlastností tenkých destiček.



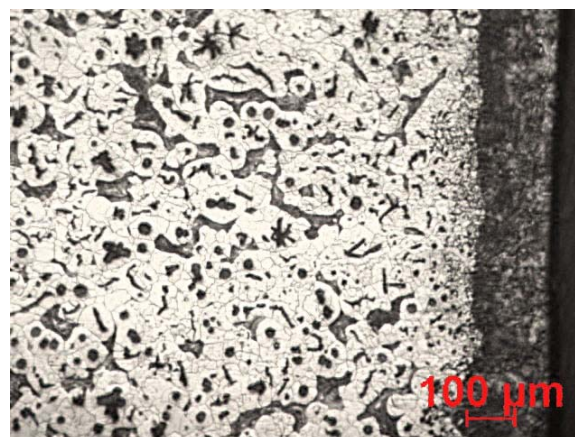
Vzorek z tavby PX15 tloušťka 5mm



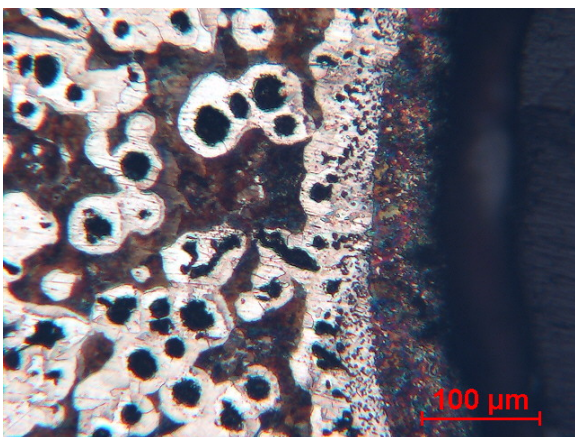
*Vzorek z tavby PX17 tloušťka 5mm
Obsah Cu 0,5 %*



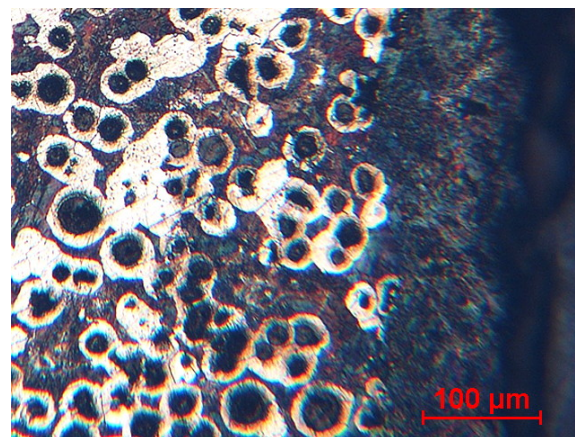
Vzorek z tavby PX18 tloušťka 5mm



*Vzorek z tavby PX19 tloušťka 5mm
Obsah Cu 0,4 %*

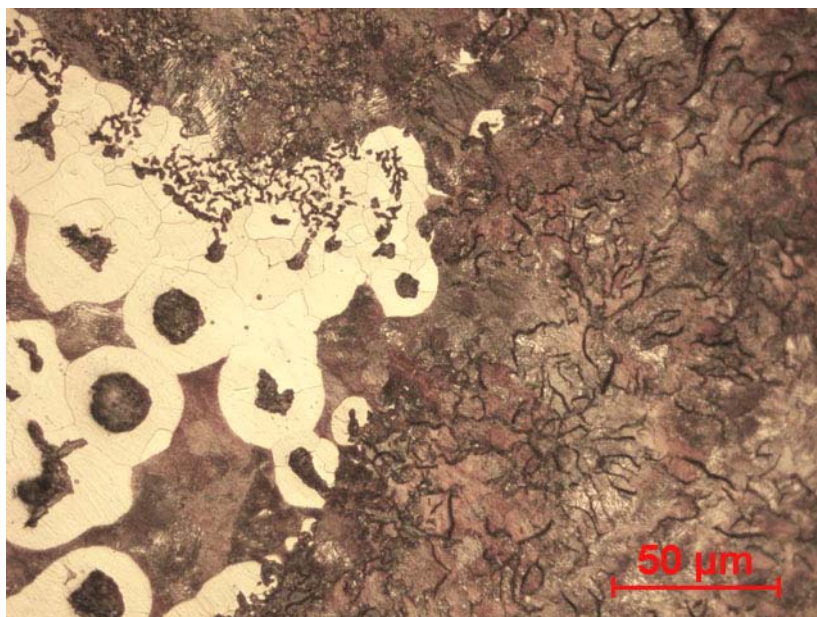


Vzorek z tavby PX20 tloušťka 4 mm



*Vzorek z tavby PX25 tloušťka 4 mm
Obsah Cu 0,54 %*

Obr.45. Snímky povrchových vrstev tenkých destiček. Srovnání tloušťky této vrstvy u vzorků z taveb bez Cu a z taveb legovaných Cu



Obr.46. Snímek povrchové vrstvy destičky tloušťky 4mm z taveniny PX17 s obsahem Cu 0,5 %.
Leptáno 3% Nitalem

Dalším úkolem bylo porovnat výsledné **vlastnosti a struktury vzorků z taveb zpracovávaných rozdílnými modifikátory**. Vzorky z taveb PX18 a PX19 modifikovaných současně KVZ a hořčíkem vykazovaly srovnatelné mechanické vlastnosti jako vzorky z nelegovaných taveb modifikovaných pouze KVZ. Jedinou výraznou odlišností byly znatelně nižší hodnoty tvrdostí nejtenčích destiček, a také celkově rovnoměrnější a nižší tvrdost destiček z taveb zpracovaných současně Mg a KVZ. Tuto skutečnost ilustruje tab.29. Díky použití Mg bylo u těchto taveb více než dvojnásobně sníženo množství KVZ použitých pro modifikaci. Popsaný jev celkově potvrzuje značný karbidotvorný vliv KVZ a velkou náchylnost takto ošetřené taveniny k tvorbě volného cementitu při rychlém ochlazení ve velmi tenkých stěnách.

Tab.29. Porovnání tvrdostí tenkých destiček z taveb PX18 a PX19 modifikovaných současně Mg a KVZ s tavnou PX20 modifikovanou pouze KVZ

	Tvrdosti [HB] jednotlivých destiček				
Číslo taveniny	3mm	4mm	5mm	8mm	10mm
PX18	207	207	204	193	179
u vstupu	180	177	179	177	174
PX19	170	211	209	187	179
u vstupu	184	177	182	179	177
PX20	390	230	212	186	186
u vstupu	190	185	188	180	179

Velmi podstatnou částí práce bylo popsat *vliv rychlosti ochlazování* na výslednou strukturu a hodnoty mechanických vlastností tenkostěnných odlitků. V praxi je rychlost ochlazování vedle ošetření líce formy funkčními nátěry ovlivněna především *tloušťkou stěny odlitku*. Tenkostěnné odlitky s tloušťkou stěny pod 5mm jsou tedy vystaveny velmi silnému prvotnímu ochlazovacímu účinku formy. To znamená že odlitek tuhne za podmínek velmi vzdálených rovnovážným. U materiálu s velkou citlivostí na rychlost ochlazování jako jsou grafitické litiny je potom velmi náročné zajistit vznik požadované struktury.

Navržený odlitek s destičkami s tloušťkou stěn od 3 do 10mm umožnil sledovat proměny struktury a mechanických vlastností litiny s klesající tloušťkou stěny. Srovnáme-li hodnoty mechanických vlastností vzorků z normalizované Ypsilonové zkoušky s hodnotami vzorků z tenkých destiček v *tab.30*, je na první pohled patrná tendence výrazného nárůstu pevnosti s tloušťkou stěny klesající pod 5mm.

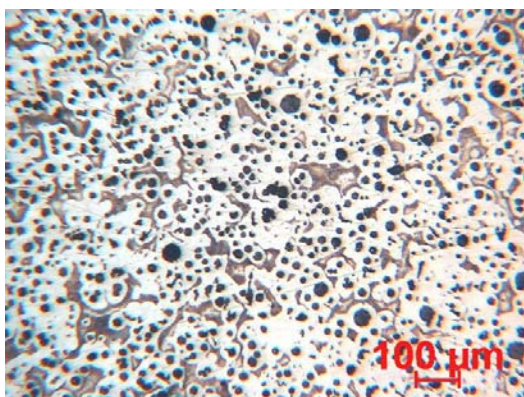
Tab.30. Srovnání hodnot mechanických vlastností vzorků z normalizované Ypsilonové zkoušky s hodnotami vzorků z tenkých destiček

Číslo tavby		3 mm	4 mm	5 mm	7 mm	10 mm	Ypsilon. zkouška vzorek I	Ypsilon. Zkouška vzorek II
PX15	Rm [Mpa]			507	332	324	402	401
	A [%]			2,33	0,82	0,90	7,73	8,16
PX17	Rm [Mpa]		374	288	228	209	343	342
	A [%]		0,22	0,10	0,03	0,02	5,43	5,58
PX18	Rm [Mpa]	459	411	380	304	319	349	352
	A [%]	1,35	0,77	0,87	0,25	1,31	6,17	6,09
PX19	Rm [Mpa]		373	369	141	260	320	321
	A [%]		0,20	0,39	0,07	0,11	6,74	6,87
PX20	Rm [Mpa]		408	445	336	363	369	363
	A [%]		0,84	3,28	0,88	1,55	4,85	4,46
PX23	Rm [Mpa]		339	377	304	329	357	362
	A [%]		0,22	0,70	0,37	1,67	3,18	2,53
PX23+	Rm [Mpa]	453	337	335	278	301	357	362
	A [%]	0,70	0,07	0,27	0,11	0,39	3,18	2,53
PX24	Rm [Mpa]			274	262	329	381	381
	A [%]			0,52	0,39	1,26	6,72	6,76
PX24+	Rm [Mpa]	557	499	352	390	408	381	381
	A [%]	4,66	5,92	0,88	3,58	6,25	6,72	6,76
PX25	Rm [Mpa]				329	350	377	374
	A [%]				0,84	1,21	3,81	2,89
PX25+	Rm [Mpa]	503	460	407	284	304	377	374
	A [%]	1,84	1,32	0,91	0,25	0,92	3,81	2,89

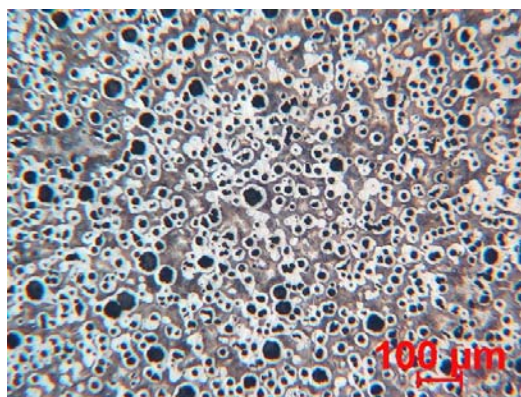
Vzhledem k tomu, že na mechanické vlastnosti grafitických litin má zásadní vliv tvar vyloučeného grafitu, není tento nárůst nijak překvapivý. Zatímco vzorky z Ypsilonové zkoušky obsahují převážně více než 90% červíkovitého grafitu, vzorky z destiček tloušťky 5mm v závislosti na množství použitého modifikátoru obsahují již 20 až 80% zrnitého grafitu a vzorky z 3mm destiček již obsahují výhradně velmi jemný zrnitý grafit viz. *obr.29* až *obr.39*. Svůj podíl na nárůstu pevnosti má samozřejmě i zvyšující se podíl perlitu ve základní kovové hmotě směrem k tenčím stěnám. Zvýšený podíl perlitu spolu se zcela odlišnou strukturou povrchové vrstvy stojí i za poklesem tažnosti u tenkých destiček, které by díky zrnitému grafitu měly naopak vykazovat tažnost větší.

Jaká je příčina zvyšujícího se podílu zrnitého grafitu ve struktuře s klesající tloušťkou stěny odlitku, přestože všechny destičky jsou z jednoho odlitku a tím pádem z naprosto identického materiálu a se stejným zpracováním? Důvodem je zcela jednoznačně zvyšující se ochlazovací rychlost směrem k tenčím stěnám. Tento jev plně podporuje krystalizační teorii červíkovitého grafitu popsanou v **kapitole 2.5**, podle které je primární tvar zárodku grafitu kuličkovitý a tento tvar je v dalších etapách tuhnutí ovlivněn austenitickou obálkou, která svými nespojitostmi umožňuje růst grafitu pouze v určitých směrech, do té doby než částice grafitu obalí zcela a tím zastaví její tvarový vývin. V dalších etapách tuhnutí a chladnutí již částice grafitu pouze mohutní vlivem difúzních pochodů. Ve velmi tenkých stěnách našich destiček jsou tedy primární kuličkovité zárodky grafitu vlivem rychlého ochlazování takřka okamžitě zcela obaleny austenitickou obálkou, která znemožní jejich tvarový vývin. Částice grafitu dále již jen mohutní vlivem difúzních pochodů. Ve velmi tenkých stěnách jsou podmínky pro difúzi velmi omezené a proto je zde výsledná struktura v podobě velmi jemného zrnitého grafitu.

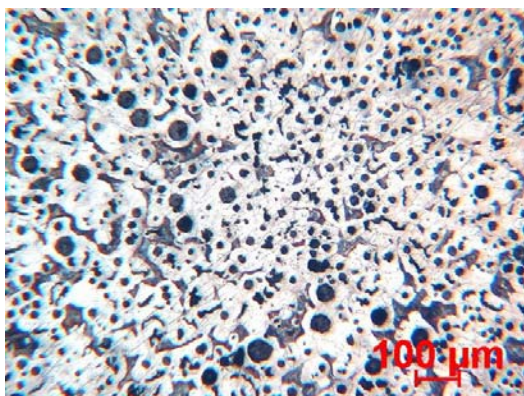
Abychom snížili ochlazovací rychlost v tenkých stěnách, byly za destičky připojeny nálitky s definovaným objemem a mohli jsme tak sledovat **vliv průtočnosti** na strukturu a mechanické vlastnosti výsledné litiny. Tato úprava se nejvýrazněji projevila snížením a zrovnoměrněním tvrdosti u tenkých destiček viz *obr.27*. Tento efekt byl nejsilnější u taveb PX23 a PX25 s obsahem Mn a Cu kdy průtočnost 80% snížila tvrdost 3mm destičky na volném konci o 100 respektive 150 HB. Snížená ochlazovací rychlost se u tenkých destiček s průtočností dále projevila mírně větší velikostí útvarů grafitu a zvýšeným podílem feritu v základní kovové hmotě. Tyto změny ilustrují následující *obr.47* až *obr.49*. U silnějších destiček se pomalejší ochlazování projevilo vyšším výskytem porezity a výrazným snížením mechanických vlastností.



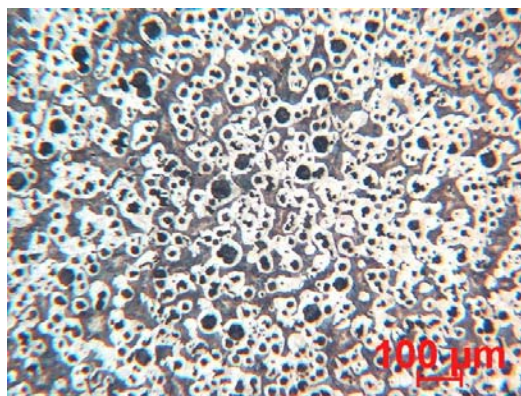
destička 3mm s průtočností 80%



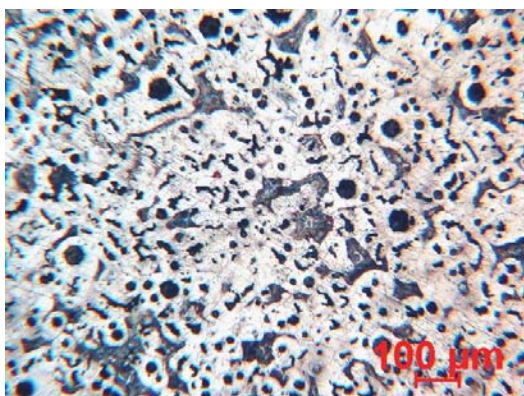
destička 3mm bez průtočnosti



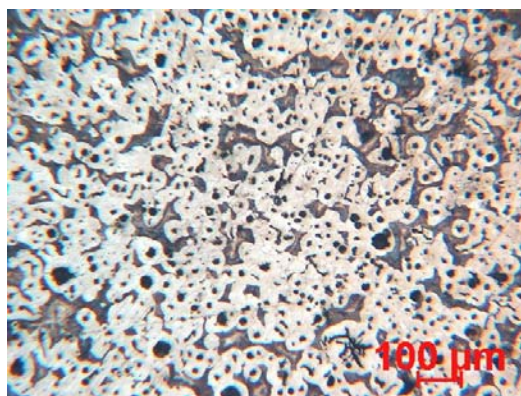
destička 4mm s průtočností 80%



destička 4mm bez průtočnosti

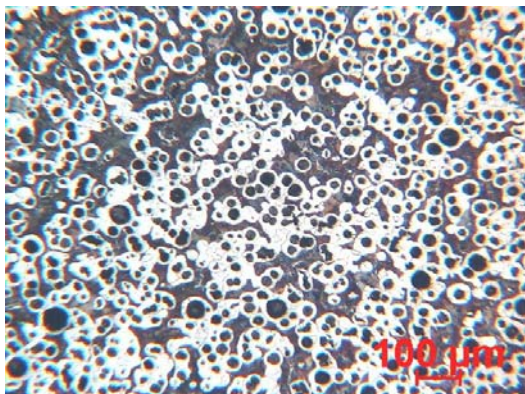


destička 5mm s průtočností 80%

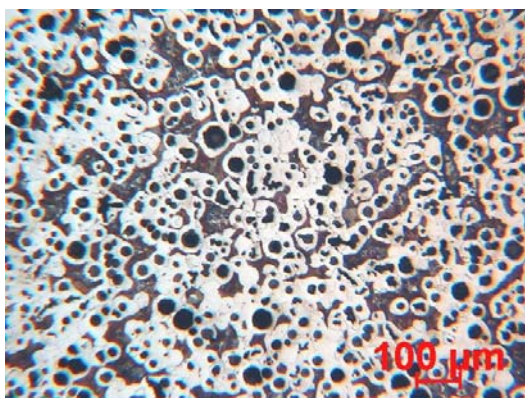


destička 5mm bez průtočnosti

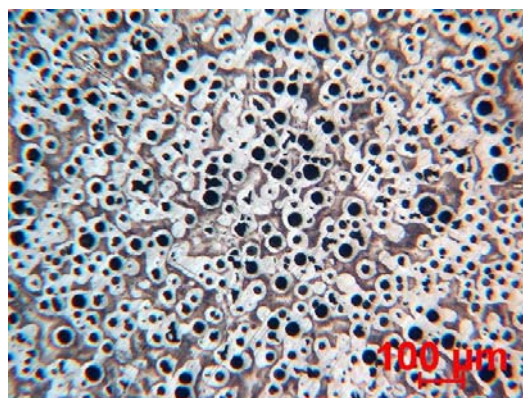
Obr.47. Porovnání metalografické struktury tenkých destiček s průtočností 80% a bez ní u tavby PX23. Leptáno 3% Nitalem



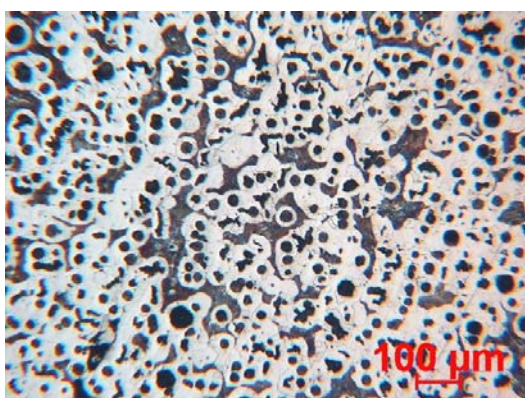
destička 3mm s průtočností 80%



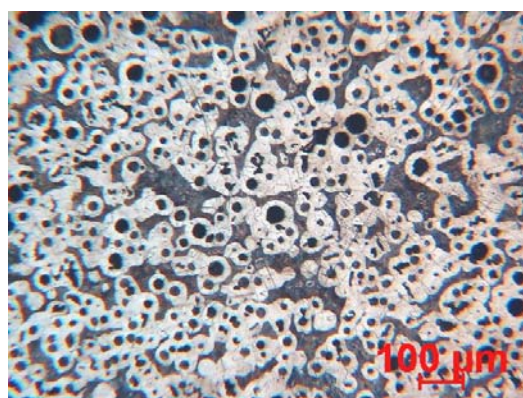
destička 4mm s průtočností 80%



destička 4mm bez průtočnosti

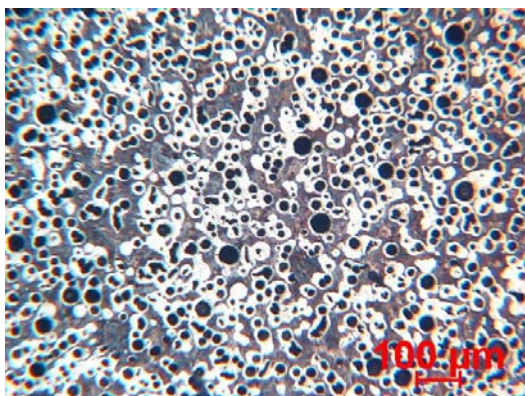


destička 5mm s průtočností 80%

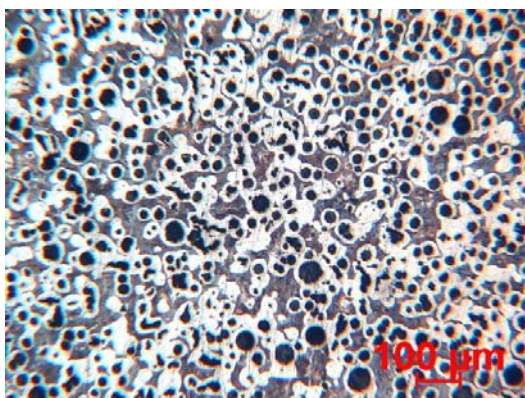


destička 5mm bez průtočnosti

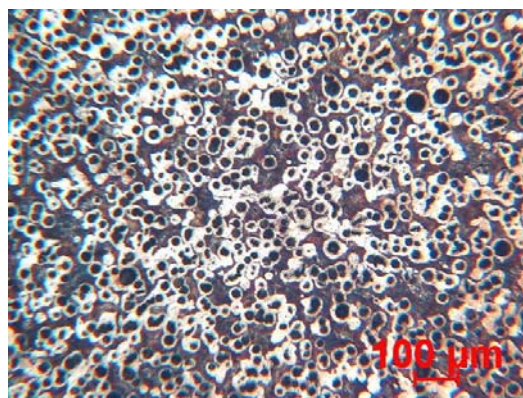
Obr.48. Porovnání metalografické struktury tenkých destiček s průtočností 80% a bez ní u tavby PX24. Leptáno 3% Nitalem



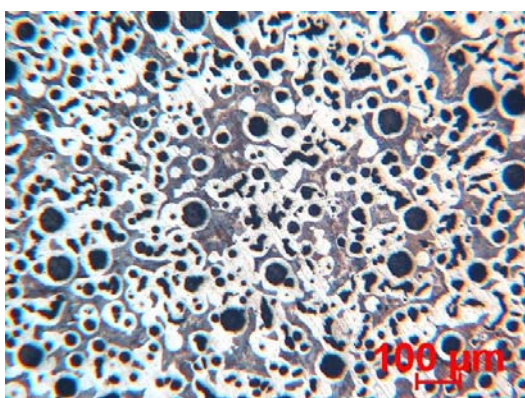
destička 3mm s průtočností 80%



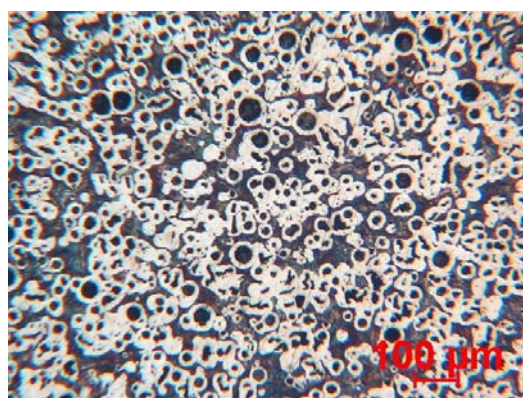
destička 4mm s průtočností 80%



destička 4mm bez průtočnosti



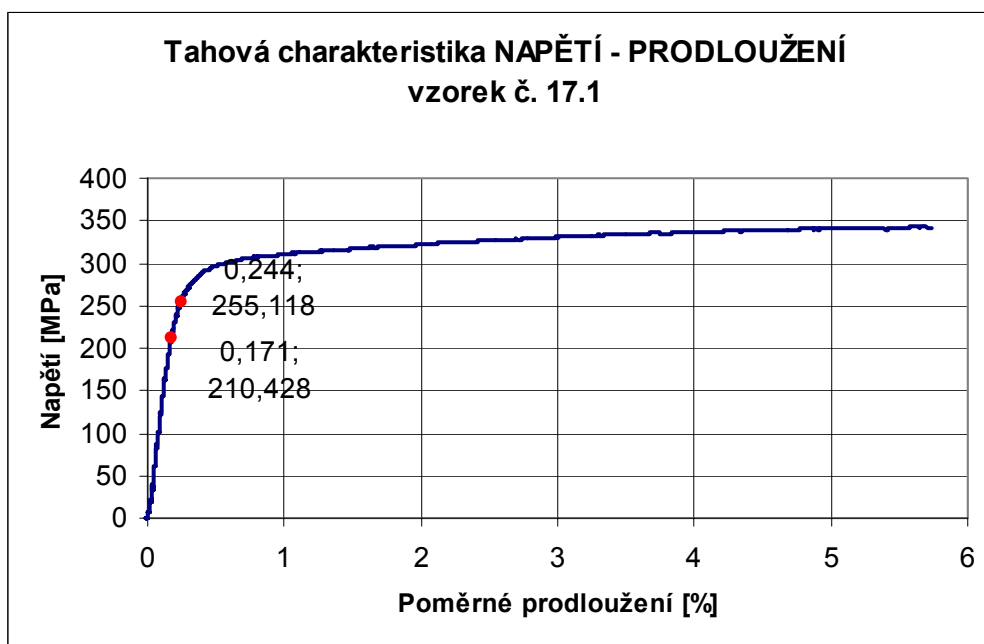
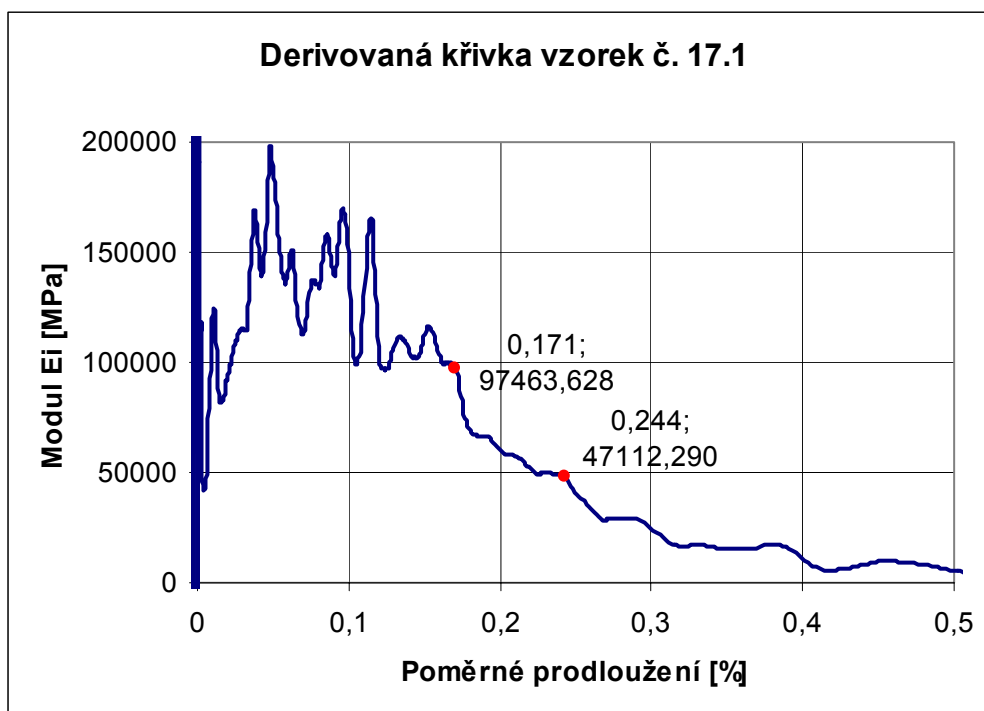
destička 5mm s průtočností 80%



destička 5mm bez průtočnosti

Obr.49. Porovnání metalografické struktury tenkých destiček s průtočností 80% a bez ní u tavby PX25. Leptáno 3% Nitalem

Zvláštní částí práce bylo **hodnocení mechanických vlastností materiálu podle nové metodiky**. Při vyhodnocování záznamů z tahových zkoušek uvedených kompletně v příloze 1 se projevila značná odlišnost křivek uváděných Exnerem a spol [30,31,32] od křivek získaných z provedených experimentů. Nicméně podle slovního popisu fyzikální podstaty jednotlivých mezí a vizuální podobnosti byly tyto meze stanoveny alespoň u většiny vzorků z Ypsilonových zkoušek. Ukázku stanovení těchto mezí u tavby PX17 podává *obr.50*.



Obr.50. Ukázka vyhodnocení mezí σ_I , σ_{II} u vzorku 1 tavby PX17

Ve všech případech se zjištěné meze mikroplastických deformací σ_I , které by měly být analogické mezi kluzu u ocelí značně lišily od pro litiny běžně udávané a softwarem vyhodnocené smluvní meze kluzu $R_{P0,2}$, a to směrem dolů. Samozřejmě námi zjištěné hodnoty mezí jsou čistě orientační, protože byly stanoveny z každé tavby pouze u dvou vzorků z Ypsilonové zkoušky a tak neumožňují statistické vyhodnocení. Ovšem díky jejich fyzikální podstatě je lze považovat za účelnější než smluvní mez kluzu $R_{P0,2}$.

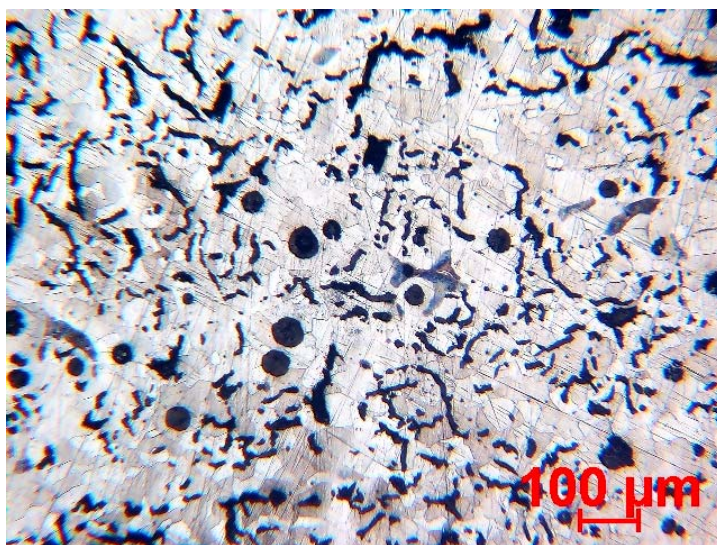
Ke správnosti námi zjištěných hodnot přispívá i tento fakt: pokud při tahové zkoušce obsahuje zkoušený vzorek vady, dojde zpravidla k jeho porušení při výrazně nižších hodnotách napětí než je jeho mez pevnosti, kolem jeho skutečné meze kluzu. K takovému porušení zjevně došlo i u vzorků z tenkých destiček některých taveb. Srovnáme-li hodnoty napětí, při kterých došlo k porušení, s hodnotami námi zjištěných mezí zjistíme, že jsou velice podobné. Srovnání těchto hodnot nabízí *tab.31*. I přes značnou nejistotu jsme pravděpodobně zjistili skutečné mezní hodnoty daných materiálů.

Tab.31. Srovnání napětí při kterých došlo k předčasnému porušení destiček s hodnotami mezí σ_I , σ_{II} zjištěných z Ypsilonové zkoušky

Označení tavby	Napětí [MPa] při kterých došlo k předčasnému porušení vzorku			Meze zjištěné z Ypsilonové zkoušky	
	destička 5mm	destička 7mm	destička 10mm	sigma I [MPa]	sigma II [MPa]
PX17	288	228	209	210	255
				220	262
PX23+		278		240	278
				245	277
PX24	274	262		270	304
			
PX25+		284	304	270	293
				257	285

Posledním dílčím úkolem práce v rámci experimentu bylo ověření poznatků zjištěných na experimentálních odlitcích a jejich *uplatnění při výrobě skutečného odlitku* z běžné produkce. V jediné za tímto účelem provedené tavně se podařilo vyrobit odlitek bez zjevných vad, s rovnoměrnou tvrdostí v rozsahu 170 až 180 HB napříč odlitkem, což odpovídá i nejpřísnějším požadavkům automobilového průmyslu při obrábění. Dosažené metalografické struktury ve stěnách odlitku s tloušťkou od 5 do 10 mm obsahují v závislosti na tloušťce stěny 20 až 90% červíkovitého grafitu. Větší místní podíl zrnitého grafitu je zde způsoben

pravděpodobně lepším rozpuštěním a využitím užitého modifikátoru a tím pádem větším obsahem zbytkových KVZ. Zavedením lepšího způsobu modifikace a průběžné kontroly jakosti by se zcela určitě dal podíl zrnitého grafitu ještě snížit. Nicméně metalografická struktura zjištěná u vzorku z Ypsilonové zkoušky, splňuje požadavky navrhované normy pro LČG, tzn. obsahuje méně než 20% zrnitého grafitu viz. *obr.51*



*Obr.51. Metalografická struktura vzorku z Ypsilonové zkoušky tavby Odlitek
Leptáno 3% Nital*

8. PŘÍSPĚVEK K POPISU MECHANISMU KRYSTALIZACE ČERVÍKOVITÉHO GRAFITU PŘI POUŽITÍ MODIFIKÁTORU NA BÁZI KVZ

Poznatky získané z provedených experimentů dávají za pravdu teoriím a autorům, podle kterých je primární tvar grafitické částice kuličkovitý a na výsledný tvar částic grafitu má zásadní vliv charakter mezifázového kontaktu austenitu, grafitu a taveniny[5,7,8,9,28,29]. U LČG tedy po první etapě eutektické krystalizace a vzniku primárního kuličkovitého grafitu nastává druhá etapa intenzivního růstu grafitu a jeho tvarovému vývinu a větvení. Grafit nejprve vytváří výběžky vyrůstající ze společného centra – roste na mezifázovém rozhraní austenitu a taveniny, kde jsou vhodné podmínky pro jeho krystalizaci. Následně eutektický austenit obaluje větve červíkovitého grafitu a izoluje je od plošného kontaktu s taveninou – spojení s taveninou si udržují pouze konce větví červíkovitého grafitu. Tímto způsobem výrazně narůstá délka větví grafitu. Nakonec eutektický austenit obalí větve červ. grafitu zcela a dojde k úplné izolaci grafitu od taveniny. Spojení grafitu s taveninou potom probíhá pouze skrz austenitickou obálku místy se zvýšenou difúzní schopností uhlíku a dochází k mohutnění větví grafitu.

Tuto teorii dále doplnili WEIDE a ZHENGUA [8] o upřesnění vlivu modifikačních prvků Mg a Ce. Svým výzkumem zjistili, že nejvyšší koncentrace modifikačních prvků je na krystalizační frontě grafitu a dospěli k názoru, že tyto prvky adsorbované na krystalizační frontě grafitu určují poměr mezi rychlostí růstu grafitu ve směrech *A* a *C*. Když je množství Mg a Ce adsorbovaných na prizmové rovině rostoucího grafitu dostatečné, dojde k omezení růstu grafitu ve směru *A* a převládá růst ve směru *C*. Nárůstem částice ve směru *C* se vytvoří nové prizmové plochy, na kterých může opět docházet k růstu grafitu ve směru *A* a tím prodlužování útvaru grafitu a jeho větvení.

Struktury dosažené ve velmi tenkých stěnách při našich experimentech byly takřka výhradně tvořeny velmi jemným kuličkovitým grafitem. Vlivem vysoké ochlazovací rychlosti během tuhnutí zřejmě došlo ke zvýšenému podchlazení a vzniku velkého množství grafitických zárodků. Primárně vzniklé kuličkovité útvary grafitu byly pravděpodobně vlivem této vysoké ochlazovací rychlosti okamžitě obaleny spojitou austenitickou obálkou, která znemožnila jejich následný tvarový vývin. Ve zbylém čase tuhnutí a chladnutí již kuličky pouze mohutněly vlivem difúzních pochodů.

Jako hraniční se během experimentů ukázala být tloušťka stěny odlitku 5 mm. Pod touto hodnotou se nepodařilo získat převážně červíkovitý grafit ani u taveb s komplexním modifikátorem ani u destiček s průtočností 80%.

Množství modifikačních prvků tedy určuje směr růstu grafitové částice a tím i její tvarový vývin, délku a složitost. Vliv modifikačních prvků ovšem působí souběžně s vyvíjející se austenitickou obálkou grafitu. V závislosti na ochlazovací rychlosti během tuhnutí a s tím související rychlosti vývinu austenitické obálky potom může, nebo nemusí k tvarovému vývinu částice grafitu vůbec dojít.

9. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS

Zatímco konvenční materiály již dosahují u některých aplikací svých hraničních možností, LČG poskytuje nové možnosti k uspokojení požadavků na vysoký výkon a nízkou hmotnost a rozměry nově navrhovaných komponent, zejména u aplikací se současným tepelným a mechanickým namáháním jako jsou bloky a hlavy spalovacích motorů a brzdové komponenty automobilů. Jako přechodový materiál mezi LLG a LKG se litina s červíkovitým grafitem nabízí k použití tam, kde jsou mechanické vlastnosti LLG nedostatečné a tam kde LKG zase postrádá některé zásadní vlastnosti jako je dobrá tepelná vodivost a schopnost útlumu. Ve srovnání s klasickou litinou s lupínkovým grafitem LČG umožňuje:

- a) snížení tloušťky stěny odlitku při stejném zatížení
- b) zvýšení zatížení při stejné konstrukci součásti
- c) snížení poškození křehkým lomem během výroby, manipulace a montáže
- d) vyšší pevnost bez nutnosti legování

a vzhledem k litině s kuličkovým grafitem LČG obecně poskytuje:

- a) lepší slévateľnost a možnost odlévání složitějších odlitků
- b) zlepšené využití prostoru formy díky nižší potřebě nálitkování
- c) vyšší tepelnou vodivost
- d) lepší obrobiteľnost
- e) například i nižší akumulaci napětí díky lepší tepelné vodivosti a nižšímu modulu pružnosti

Budoucnost LČG je tedy v aplikacích vyžadujících současně pevnost, dobrou slévateľnost, vysokou tepelnou vodivost a rozsáhlé obrábění. V souvislosti s použitím LČG na bloky motorů je zajímavé zmínit, že díky vyšší pevnosti a tuhosti oproti LLG a slitinám hliníku, dochází během pracovního cyklu ve válci k výrazně menším deformacím válce a vrtání si lépe udržuje svůj tvar i rozměry. Tím se snižuje tření pístu a následně spotřeba oleje a emise motoru. Vyšší tuhost LČG také snižuje celkovou hlučnost motoru a to i přesto že schopnost útlumu LČG je znatelně nižší než u LLG. Vyšší modul pružnosti totiž výrazně posunuje rezonanční frekvenci bloku motoru směrem nahoru a tím jí i vzdaluje od zápalné frekvence. Výsledkem je celková nižší hlučnost motoru z LČG.

Pro konstruktéry, kteří značnou měrou ovlivňují rozšíření použití LČG je ovšem třeba zdůraznit, že není vhodné při přechodu na tento materiál přebírat nezměněný design odlitku, protože nižší tepelná vodivost LČG může způsobit, že součást bude pracovat za vyšších teplot a to ovlivní únavové vlastnosti. Je tedy lepší se ubírat spíše cestou snižování tloušťky stěn a zachovat tak přenos tepla za současného snížení hmotnosti. Při snižování hmotnosti je potom potřeba se zaměřit spíše na větší tloušťky stěn, protože ty minimální jsou již na hranici technologických možností sléváren a jejich zeslabení by přineslo více problémů než výhod, zatímco snížení tloušťky stěny z 20 na 15mm na vysoce namáhaných místech přináší značnou hmotnostní úsporu a přitom nenese žádná pevnostní rizika.

Navzdory tradičnímu požadavku na homogenní mikrostrukturu napříč odlitkem u grafitických litin nabízí LČG obrovskou výhodu získání značně proměnlivé mikrostruktury u různých míst odlitku v závislosti na požadované místní pevnosti, tepelné vodivosti, na potřebě obrábění. Takže díky vysoké citlivosti materiálu na rychlost ochlazování a promyšlenému designu můžeme dostat výsledný odlitek s výrazně nadřazenými vlastnostmi, než by měl odlitek s homogenní strukturou. Výborně tuto skutečnost ilustruje například odlitek bloku motoru – v oblasti vrtání válců, která je ve středu odlitku a chladne nejpomaleji, dostaneme strukturu s maximem červíkovitého grafitu a výbornou tepelnou vodivostí a dobrou obrobiteľností; naopak obvodové partie odlitku, které tvoří nosnou část celého bloku a zásadním způsobem ovlivňují jeho celkovou tuhost, budou tuhnout rychleji a získají strukturu s velkým podílem kuličkového grafitu a tím i výrazně vyšší mechanické vlastnosti. O využitelnosti tohoto principu svědčí i patenty FORDU[36] a MAZDY[37] na bloky motorů z grafitických litin s nehomogenní strukturou.

Shrnutí výsledků experimentů:

Přestože bylo provedeno pouze limitované množství taveb a z nich získána obvykle jediná sada vzorků, a soubor takto získaných dat neumožňuje statistické vyhodnocení, lze z výsledků provedených experimentů určit základní předpoklady úspěšné produkce tenkostěnných odlitků z LČG modifikované Kovy vzácných zemin s požadovanou strukturou a vlastnostmi.

V pořadí podle důležitosti těmito předpoklady jsou:

- 1) **Použití kvalitních vstupních surovin** s přesně známým chemickým složením a nízkým obsahem nežádoucích prvků, především pak P a S
- 2) **Správná modifikace taveniny** (množství modifikátoru, a její správný průběh s ohledem na použitý modifikátor a metodu modifikace)
Při našich experimentech, tzn. použití neseparovaných KVZ jako modifikátoru a polévací metody pro modifikaci, se pro dosažení maximálního množství červíkovitého grafitu nejvíce osvědčil přídavek 0,052 až 0,068 % KVZ
- 3) **Důkladné, nejlépe dvoustupňové očkování** s využitím vysoce účinných typů očkovadel v množství 0,6 až 0,8 % FeSi75 ve zpracovací pánvi a následně stejné množství Superseedu ve druhém stupni očkování, již po modifikaci, těsně před odléváním.
- 4) **Nadeutektické chemické složení s vysokým obsahem Si** kolem 3%. Vysoký obsah Si potlačuje výskyt zákalky a zaručuje nízkou a rovnoměrnou tvrdost u velmi tenkých stěn odlitku. U zkušebního odlitku spojky na potrubí bylo dosaženo velmi rovnoměrné tvrdosti 175 HB s maximálními odchylkami +/- 5 HB, což je velice důležité pro efektivní obrábění.
- 5) **Ochlazovací rychlost** – vhodně zvolenou konstrukcí odlitku, zavtokováním popř. zvýšenou průtočností musí být umožněn tvarový vývin červíkovitého grafitu.
Celkově se vyšší průtočnost projevila především snížením a zrovnoměněním tvrdosti. To je velice důležité, protože vysoká tvrdost a sklon k tvorbě karbidů jsou hlavní argumenty odpůrců používání neseparovaných KVZ pro výrobu LČG.
- 6) **Vliv legujících prvků**. Experimenty ukázaly na potřebu držet obsah Mn i Cu na co nejnižší úrovni. Vyšší obsah Mn se projevoval především zvýšenou tvrdostí u tenkých stěn a Cu způsobovala u odlitků vznik nežádoucí povrchové vrstvy s perlitickou maticí a lupínkovým grafitem, která výrazně snižovala mechanické vlastnosti tenkostěnných zkušebních vzorků.

Celkově práce shrnuje výhodné a v některých případech nezastupitelné vlastnosti LČG a ukazuje možnost výroby tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl za pomoci neseparovaných KVZ, tzn. bez potřeby speciálních postupů a zařízení pro modifikaci. Výsledky experimentálních taveb potom ukazují vysokou citlivost tohoto materiálu na změnu produkčních parametrů a přináší ucelený přehled o vlivu těchto parametrů, zejména tloušťky stěny odlitku, množství modifikátoru a přídavku základních legujících prvků na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti LČG. Dále práce nastiňuje nové možnosti zkoušení a vyhodnocování mechanických vlastností grafitických litin s možností zjištění skutečných, nikoliv smluvních, mezních hodnot napětí a ukazuje, že inteligentní design odlitku s ohledem na znalost chování LČG v tenkých stěnách přináší další možnosti využití tohoto specifického materiálu v automobilovém průmyslu.

Práce vznikla s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501.

10. SEZNAM LITERATURY

- [1] Dawson, S.: Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design, paper presented at Werkstoff und Automobylantrieb Dresden Germany 28-29 October 1999.
- [2] Powell, W.; Levering, P.: CGI The Little Cast Iron That Could, Modern Casting, October 2002.
- [3] Konečný, L.: Možnosti použití litiny s červíkovitým grafitem pro výrobu odlitků (Habilitační práce), TU Liberec, 1995.
- [4] Svoboda, A.: Katalog odlitků z litiny s červíkovitým grafitem, Státní výzkumný ústav materiálu Praha.
- [5] Masaryk, P.; Bechný, L.; Skočovský, P.: Príspevok k štúdiu kinetiky a mechanizmu eutektickej reakce grafitických litin, II. Metalurgické sympóziu – I. Diel, Trenčanské Teplice, 30.-31.10.1990.
- [6] Boucník, P.: Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných vlastností odlitků, Disertační práce, Brno, VUT, fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, 2001.
- [7] Stránský, K.; Bechný, L.; Masaryk, P.; Vřešťál, J.; Million, B.: Model růstu kompaktního tvaru grafitu a jeho užití v šedě tuhoucích litinách, Slévárenství, 1991, č.5/6, str. 154-160.
- [8] Zhu Zhenhua, Chang Weide: The Primary Crystallization of Compacted/ Vermicular Graphite Cast Iron. 53rd World Foundry Congress, Praha 7.-12.8. 1986.
- [9] Unkić, F.; Popović, I.: Solidification Mechanism of Vermicular Graphite Cast Iron, 3. Medzinárodné metalurgické sympóziu, Rájecké Teplice 2.-3.11.1993.
- [10] Technická informace firmy Elkem.
- [11] Vrba M.: Studium vlivu kyslíku na efektivnost modifikace u tvárných litin (diplomová práce), TU Liberec 1999.
- [12] Jelínek M.: Kvantifikace vlivu aktivity kyslíku na strukturu a vlastnosti grafitických litin (Disertační práce), TU Liberec 2002.
- [13] Dawson, S.; Hollinger, I.; Smiles, P.: The Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron, Paper presented at the 1998 Global Powertrain Congress, October 6-8; Detroit, Michigan, USA.
- [14] Onsoien, I. M.: Microstructure evolution in ductile cast iron containing rare earth metals. Doktor Ingenior Thesis, 1997, Norwegian University of Science and Technology.

- [15] American Foundrymen's Society, Inc.: Ductile Iron Handbook. American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, U.S.A. 1993. 278 s. ISBN 0-87433-124-2.
- [16] Loper, C.R.; Lalich, M.J.; Park, H.K.; Gyarmaty, A.M.: The relationship of microstructure to mechanical properties in compacted graphite irons, AFS Transactions 80-160, str. 313-330, 1980.
- [17] Tholl, M.; Magata, A.; Dawson, S.: Practical experience with passenger car engine blocks produced in high quality compacted graphite iron, SAE Paper No. 960297, SAE International, 1996.
- [18] Wessén, M.: On The Mechanism of Structure formation in Nodular Cast Iron. Doctoral Thesis, The Norwegian University of Science and Technology, 1997.
- [19] Jacobs, M.H.; Law, T.J.; Melford, D.A.; Stowell, M.J.: Metals Tech. 1974, Nov., str.97.
- [20] Skaland, T.; Grong, O.; Grong, T.: Met. Trans. A, 1993, 24A, str.2321.
- [21] Schroeder, T.; Dawson, S.: Practical Applications for Compacted Graphite Iron, ASF Transactions 2004, AFS, Illinois, USA.
- [22] Rodter, H.: Compacted Graphite Iron – New Recognize Quality Cast Material, Slévárenství č.9, str. 395-397, 2005.
- [23] Kozelský, P.; Dobrovský, L.; Duy, T.: Termodynamika rafinace oceli kovy vzácných zemin, Hutnické aktuality, 1992, č.2.
- [24] Vondrák, V.: Sekundární metalurgie litin, skripta VŠB - TU Ostrava, 1996
- [25] Andrejev, V. V.; et al.: Investigation on characteristic of vermicular graphite formation in část iron. Russian CASTING PRODUCTION, No.5, May 1980, str.5-6.
- [26] Stefanescu, D. M.;Dinescu, L.; Craciun, S.; Popescu, M.: Production of vermicular graphite cast iron by operative control and correction of graphite shape. 46th International Foundry Congress, Madrid, paper 37, 1979.
- [27] Loper, C.R.; Liu, P.C.; et al.: Observation on the graphite morphology of compacted graphite cast iron. AFS Transaction, Vol. 89, 1981, str. 65-79.
- [28] Loper, C.R.; Pan, E.N.; Ogi, K.:Analysis of the solidification process of compacted/vermicular cast iron. AFS Transactions, Vol. 90, 1982, str. 509-527.
- [29] Itofuji, H.; et al.: The formation mechanism of compacted/vermicular graphite in cast iron, AFS Transactions, Vol. 91, 1983, str. 831-840.
- [30] Exner, J.; Čech, J.: Hodnocení vlastností litin podle tahových deformačních charakteristik. Slévárenská ročenka 1993, str. 45-51.

- [31] Exner, J.; Nová, I.; Strnadová, M.; Havel, M.: Metodika stanovení a posouzení vybraných mechanických vlastností jakostních grafitických litin. Sborník Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a tvárné litiny, 16. a 17. dubna 1996, VUT v Brně, str. 5-14.
- [32] Jech, M.: Predikce vlastností odlitku s využitím metalografických a technologických procesů. Dizertační práce, TU v Liberci 2006.
- [33] Konečný, L.: Výsledky měření aktivity kyslíku v litinách, 13. celostátní konference, Brno 1998.
- [34] Hummer, R.; Ebner, J.; Schlüsselberger : Aktivita kyslíku v litinách pro výrobu LKG, Slévárenství, 2000, č.1, str.71.
- [35] Ebner, J.: Praktische Erfahrungen bei der Schmelzkontrolle von Gusseisen mit Kugelgraphit mit Hilfe von termischer Analyse und Sauerstoffaktivitätsmessung, Giesserei 84, 1997, č. 12-16, str. 40-48.
- [36] Gu, Y., Ford Motor Company Ltd: Engine cylinder block, European Patent Application EP 0 769 615 A1, April 23, 1997.
- [37] Mazda Motor Corporation: Ductile Iron cylinder block with gray iron bore region, Japanese Patent 6-106331, April 19, 1994.

PŘÍLOHY

